

# 基于情境重构模型的非常规 突发事件应急管理研究

王颜新 黄敏芳 著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 · BEIJING

## 内 容 简 介

本书在对国内外相关研究成果进行梳理和总结的基础上,以非常规突发事件应急管理理论、灾害系统工程理论、情景分析和情境演算理论等作为理论基础展开介绍。从剖析事件情景、情境和情境重构等重要概念着手,采用信息学、本体论、演化分析、定量与定性相结合等多种方法,介绍面向“情景-应对”的非常规突发事件情境重构表达框架、情境表达要素分解模型,情境形式化描述方法、多层次情境网络模型、非常规突发事件情境重构模型方法,以及可视化仿真分析等关键问题。本书介绍的情境重构模型方法,为“情景-应对”范式下建立事件情景、分析事件的动态情境演化、研究面向情景的应对决策建立了理论基础,也为应急管理中事件态势的展示和决策者对事件的认知与交互开辟了一条新的途径。

本书适合从事应急管理、公共管理的管理人员及科研人员阅读。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

### 图书在版编目(CIP)数据

基于情境重构模型的非常规突发事件应急管理研究/王颜新,黄敏芳著. —北京:电子工业出版社,2017.10

ISBN 978-7-121-32778-0

I. ①基… II. ①王… ②黄… III. ①突发事件—公共管理—研究 IV. ①D035

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 238261 号

责任编辑:徐蔷薇 特约编辑:马晓云

印 刷:

装 订:

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本:720×1000 1/16 印张:14.75 字数:189 千字

版 次:2017 年 10 月第 1 版

印 次:2017 年 10 月第 1 次印刷

定 价:59.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888, 88258888。

质量投诉请发邮件至 [zltz@phei.com.cn](mailto:zltz@phei.com.cn), 盗版侵权举报请发邮件至 [dbqq@phei.com.cn](mailto:dbqq@phei.com.cn)。

本书咨询联系方式: [xuqw@phei.com.cn](mailto:xuqw@phei.com.cn)。

# 前 言

随着全球经济一体化的深入发展以及我国工业化进程的明显加快，城市的发展越来越成为促进我国经济社会发展、参与国际竞争的载体。与此同时，城市的发展也正面临着基础设施、资源环境、人口流动、区域协调、组织行政等方面日渐明显的各种矛盾，各类突发事件逐渐成为普遍性问题。能否处理好突发事件引发的危机将直接关系到中国的政治稳定和经济发展，直接关系到社会主义和谐社会的构建。对于破坏性巨大的非常规突发事件的应急管理比普通灾害事件的管理更为困难。首先，从应急管理客体（突发事件）上看，城市中社会流动性和复杂性空前提高，突发事件的衍生、次生事件日益上升，且突发事件的原生事件与各级衍生事件逐步形成链式破坏效应。某些情况下，突发事件的链式破坏效应造成的危害程度已远超过原生事件本身。例如，2005 年哈长城市群发生的松花江水体污染事件，起因为吉林市中石油吉林石化公司 101 厂爆炸，导致了松花江水体污染；随后导致了哈尔滨全城停水事件，引发市民集体恐慌；进而又导致中俄两国的外交事件。突发事件的链式破坏效应使应急管理工作不仅要面临突发性和紧迫性的困难，而且也面临着极度不确定性，给应对组织工作带来巨大挑战。其次，从应急管理主体（应急管理组织）上看，非常规突发事件常常是包含多主体的系统。突发事件应对过程涉及多方主体的利益，主体的决策偏好导致了决策行为的多样性，而主体决策目标差异则导致应对决策上的矛盾冲突。因此，应急过程中多主体之间的协同与博弈并存，需要研究减少主体间的冲突与矛盾、促进协调合作的协同机制与方法支持。

综上所述，一旦发生非常规突发事件，在时间和空间双维度上的级联破坏效应较一般突发事件更为明显，对任何一个环节的控制、应对不力都可能演变成大范围的危机。针对这一现象，应急管理工作的视角需要从被动应对逐步转换到主动应对。如何通过建立健全非常规突发事件协同治理机制，加强城市各级政府之间、政府和社会之间的协同治理，从而提高政府应急处理能力，已成为社会可持续发展的关键和难点问题。

本书以作者近几年在灾害应急研究中的认识结论为主，从非常规突发事件的情境重构角度展开论述。在对国内外相关研究成果进行梳理和总结的基础上，以非常规突发事件应急管理理论、灾害系统工程理论、情景分析和情境演算理论等作为理论基础展开介绍。从深入剖析非常规突发事件情景、情境和情境重构等重要概念着手，采用信息学、本体论、演化分析、定量与定性相结合等多种方法，介绍面向“情景-应对”的非常规突发事件情境重构表达框架、情境表达要素分解模型、情境形式化描述方法、多层次情境网络模型、非常规突发事件情境重构模型方法，以及可视化仿真分析等关键问题。本书介绍的情境重构模型方法，为“情景-应对”范式下建立事件情景、分析事件的动态情境演化、研究面向情景的应对决策建立了理论基础，也为应急管理中事件态势的展示和决策者对事件的认知与交互开辟了一条新的途径。

全书共7章，第1~第5章及第7章由王颜新博士撰写，第6章由黄敏芳博士撰写，全书由黄敏芳博士校对。

# 目 录

## 第 1 章

非常规突发事件与情境重构 .....	1
1.1 非常规突发事件应急管理的现状 .....	3
1.2 情境重构研究对应急管理的意义 .....	6
1.2.1 情境重构的研究目的 .....	6
1.2.2 研究意义 .....	8
1.3 研究现状及评述 .....	9
1.3.1 突发事件应急管理研究现状 .....	9
1.3.2 重大灾害及其情景表现理论 .....	14
1.3.3 灾害模拟仿真系统研究 .....	24
1.3.4 研究述评 .....	25
1.4 本书研究内容采用的研究方法和技术路线 .....	28
1.4.1 研究方法 .....	28
1.4.2 技术路线 .....	29
1.5 研究内容与研究框架 .....	30
1.5.1 主要研究内容 .....	30
1.5.2 研究范围界定 .....	31
1.5.3 研究内容框架 .....	31

## 第2章

非常规突发事件情境重构体系 .....	35
2.1 概念界定 .....	37
2.1.1 非常规突发事件情景与情境 .....	37
2.1.2 非常规突发事件情境重构 .....	42
2.2 非常规突发事件的特征及典型情境 .....	43
2.3 非常规突发事件情境重构体系框架 .....	46
2.4 非常规突发事件的情境要素 .....	49
2.4.1 情境结构要素 .....	51
2.4.2 情境驱动要素 .....	55
2.5 非常规突发事件的情境演化机理 .....	56
2.5.1 非常规突发事件演化分析的理论视角 .....	58
2.5.2 基于情境的演化机理分析 .....	59
2.6 本章小结 .....	66

## 第3章

非常规突发事件情境描述方法 .....	69
3.1 情境的多源信息融合处理 .....	71
3.1.1 情境信息分类及来源 .....	72
3.1.2 面向知识的情境信息融合方法 .....	74
3.2 情境本体设计 .....	81
3.3 基于本体的情境网络设计 .....	84
3.3.1 三层情境网络结构 .....	85

3.3.2 情境描述语言选择及描述过程	89
3.4 本章小结	92

## 第4章

非常规突发事件情境重构方法	93
4.1 非常规突发事件情境重构途径	95
4.2 非常规突发事件情境重构流程	96
4.3 基于模糊情境规则推理的重构方法	98
4.3.1 模糊情境规则推理概述	99
4.3.2 模糊情境规则建立	100
4.3.3 模糊情境规则推理示例	102
4.3.4 基于逻辑情境演算的情境重构算法	105
4.4 基础设施关联的情境规则设计	108
4.4.1 基础设施网络的情境依赖描述	109
4.4.2 情境关联规则描述	110
4.5 本章小结	114

## 第5章

非常规突发事件情境重构可视化方法	115
5.1 情境重构可视化的主要任务	117
5.2 可视化模型设计	119
5.2.1 图元设计	119
5.2.2 情景序列的可视化	120
5.2.3 多层次情境网络的拓扑可视化实现	121

5.3	可视化系统原型的部分设计与实现 .....	128
5.3.1	系统的分类情境功能设计 .....	129
5.3.2	预案管理 .....	131
5.3.3	情境重构模型的分布式管理设计 .....	133
5.4	基于大数据的协同应急管理平台设计 .....	140
5.4.1	系统体系结构设计 .....	142
5.4.2	关键技术讨论 .....	143
5.5	本章小结 .....	145

## 第 6 章

非常规突发事件应对决策体系 .....	147
6.1 应对决策集成体系构建 .....	149
6.2 体系集成关系的系统动力分析 .....	155
6.3 非常规突发事件应对任务的容错规划模型体系 .....	157
6.3.1 灾害情景规划模型构建 .....	158
6.3.2 任务容错规划模型构建 .....	160
6.3.3 知识支持集成模型构建 .....	164
6.4 本章小结 .....	166

## 第 7 章

非常规突发事件应急决策及情境重构案例研究 .....	167
7.1 生产中断情景下供应链销售应急决策研究 .....	169
7.1.1 约束理论与约束满意决策方法 .....	171
7.1.2 分销应急决策模型 .....	176



7.1.3	约束满意决策方法 .....	180
7.1.4	算例 .....	183
7.2	复杂电网中的连锁故障应急研究 .....	186
7.2.1	电网连锁故障的演化分析 .....	188
7.2.2	基于节点度有限的电网连锁故障模型 .....	190
7.2.3	连锁故障应对案例 .....	194
7.3	2008 年冰雪灾害应对案例 .....	198
7.3.1	电网破坏的灾害情境要素分析 .....	201
7.3.2	复杂电网故障的情境网络 .....	202
7.3.3	复杂电网故障的情境规则设计 .....	206
7.4	本章小结 .....	209
结论 .....		210
参考文献 .....		213

# 第 1 章

## 非常规突发事件与情境重构

- 1.1 非常规突发事件应急管理的现状
- 1.2 情境重构研究对应急管理的意义
- 1.3 研究现状及评述
- 1.4 本书研究内容采用的研究方法和技术路线
- 1.5 研究内容与研究框架



## 1.1 非常规突发事件应急管理的现状

---

非常规突发事件（Unconventional Emergency）是指前兆不充分、难以预测、复杂性特征明显、存在潜在次生衍生危害、一旦发生后导致严重破坏的突发事件。从内在本质上看，非常规突发事件是一类极端重大的不确定性事件；从外在表现形式上看，非常规突发事件常常形成一系列危害极其严重的灾害事件链；从应对方式上看，非常规突发事件的应对处置大多需要涉及持续演化的复杂系统或过程，采用常规应对方式的效果不佳，因此需要采用非常规的处置方式。由于自然、地理条件等客观原因，我国一直都是一个灾难多发的国家，各类非常规突发事件时有发生。据统计，“十五”期间我国每年因自然灾害、事故灾难、公共卫生事件和社会安全事件造成的损失严重，相当于 GDP 的 6% 左右。我国每年因自然灾害、事故灾难、公共卫生和社会安全等突发事件造成的非正常人员死亡数量超过 20 万人，非正常死亡率约为 26%，伤残超过 200 万人，经济损失超过 6000 亿元<sup>[1]</sup>。表 1-1 列举了中国 2008 年以来发生的典型自然灾害类非常规突发事件。其中最为典型的非常规突发事件是 2008 年的汶川大地震，波及了四川、甘肃、陕西和重庆等地的 16 个省（直辖市、自治区）、417 个县，灾区总面积达 44 万平方公里，共计 8.7 万人死亡，受灾人口逾 4500 万人，造成 8400 余亿元的经济损失。这场由大地震引发的巨大灾害导致地震灾区范围内的基础设施网络（包括电力、供排水、燃气、热力、供油系统以及通信、交通等公用设施网络）全部中断，给人民生活带来了极其严重的危害。通过此次灾害进行总结可以发现，这次巨大灾害破坏的形成除了地震这

一原发致灾事件之外，电力基础设施破坏导致的大面积断电是灾难扩散的重要原因，加剧了关键基础设施网络的破坏和失效，给管理者的应对决策以及灾害救援等工作造成了极大的困难。国内外类似灾害事件已经表明：由自然灾害等突发事件形成和引发的关键基础设施网络体系内的技术和功能性失效都极易扩散到其他领域或设施部门，灾害的负面后果被成倍放大，从而形成灾害链条式扩散的“连锁效应”，造成常规应对方式的失效，并加剧抗灾救灾应对的混乱局面和应对决策上的困难，进而引发社会性灾难。这类突发事件给人类社会带来了巨大的潜在威胁，也促使全世界的专家学者加速启动了全面、系统研究非常规突发事件应急管理理论与方法的进程。

非常规突发事件的应对涉及多个领域，在应对体系构建、组织架构管理、决策管理模式及技术支持手段等方面都需要有相应的改变。在非常规突发事件的特殊约束情境下，如何突破风险管理的“预测-应对”传统模式，针对非常规突发事件的预测难题，创造并完善“情景-应对”的应对响应模式，这是一项艰巨的历史性科学理论创新任务。从事件的情景状态和动态情境变化两个角度进行分析，研究非常规突发事件的情境网络描述和情境重构就是其中极为重要的原创理论研究任务之一，需要多学科研究者共同攻关，开展创造性的工作。

表 1-1 中国 2008 年以来发生的典型自然灾害类非常规突发事件

发生时间	地 点	事件及影响情况	情境特征
2008 年年初	南方十多个省市	持续低温、雨雪和冰冻天气对电力、交通等多个行业造成严重影响，死亡近百人，影响全国上亿人	低温、雨雪等天气形成气象灾害链情境，影响电力系统，随之形成基础设施的级联失效情境
2008 年 5 月	四川省	地震造成大量房屋倒塌，大面积道路中断。死亡超过 9 万人，受伤者数百万人	地震造成环境破坏，导致电力、交通等多类设施被破坏，形成灾害链情境
2010 年 6 月 28 日	贵州省安顺市关岭县	强降雨发生山体滑坡，泥石流总长 1.5 公里左右，导致两个村民组 38 户、107 人被掩埋	灾害气象与特殊地质环境相互作用，形成灾害链情境

续表

发生时间	地 点	事件及影响情况	情境特征
2010 年 8 月	甘肃省甘南 州舟曲县	强降雨导致泥石流灾害。泥石流冲进县城，并截断河流形成堰塞湖，造成特大山洪地质灾害。遇难 1270 人，失踪 474 人，受伤住院人数 70 人	灾害气象与特殊地质环境相互作用，形成灾害链情境
2010 年 9 月 2 日	福建漳州	在热带风暴“狮子山”影响下，持续出现暴雨、局部大暴雨的强降水过程。超过 10 万人受灾	灾害气象之间相互作用形成灾害链情境
2010 年 9 月 20 日	福建漳浦、广东等地	台风“凡亚比”造成广东省受灾人口接近 160 万人，其中死亡人数 80 人，失踪 58 人	灾害气象直接作用于受灾对象，产生破坏情境
2012 年 7 月 21 日	北京及周边地区	遭遇 61 年来最强暴雨和洪涝灾害，持续 16 个小时，致 79 人死亡，房屋倒塌 10660 间	灾害气象之间相互作用形成灾害链情境
2012 年 8 月 8 日	浙江、上海、江苏、安徽	台风“海葵”登陆时中心气压 960 百帕，近中心风力为 14 级，致 6 人死亡，217.3 万人紧急转移	灾害气象直接作用于受灾对象，产生破坏情境
2013 年 7 月中上旬	四川盆地、西北华北地区	强降雨引发洪涝、山体滑坡，致 319 人死亡失踪，1590.7 万人受灾	灾害气象直接作用于受灾对象，产生破坏情境
2016 年 6 月	长江中下游地区	持续强降雨引发洪涝灾害，致 11 省 67 市 331 县的 170 人死亡或失踪，1.6 万群众转移	灾害气象之间相互作用形成灾害链情境

非常规突发事件的类型众多，其发生发展过程中的情景特征也各异。本书重点关注自然灾害类的非常规突发事件，针对其发生发展规律展开研究。这类非常规突发事件是指给人类生存带来危害或损害人类生活环境的自然现象，包括洪涝、干旱灾害，台风、冰雹、雪、沙尘暴等气象灾害，火山、地震灾害，山体崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害，风暴潮、海啸等海洋灾害，森林草原火灾和重大生物灾害等自然灾害。非常规突发事件的应对决策本质上属于应急响应决策范畴，应对的基本瓶颈难题是突发事件的灾难情境难以在短时间内被有效、稳定识别。由于非常规突发事件具有历史罕见性、突然爆发性、致灾因素复杂性、极度破坏性、时效紧迫和极端不确定性等特征，非常规突发事件的演化发展过程中存在大量的次生、

衍生及耦合等各种非线性动力学关系。非常规突发事件的应对处置大多需要涉及持续演化的复杂系统或过程，结构化、半结构化、非结构化的决策问题交织在一起、应对动员状态多样、应对中的阶段性决策结果通常不可逆，这三点决定了应对决策的高度复杂性。在应对实践中，面对罕见的、突然爆发的、成因关系复杂的非常规突发事件，决策者的应对知识经验匮乏，无法或不能完全获取充分完备的信息。在这种非常规态势情况下，包含静态情景状态的动态情境是界定应对决策任务的基本识别要素，要描述并展现非常规突发事件情境及其未来演化趋势，需要适应的非常规突发事件情境描述和情境重构模型的基础理论、方法、技术和应用模式。

## 1.2 情境重构研究对应急管理的意义

---

### 1.2.1 情境重构的研究目的

本书将从突发事件应急管理理论出发，结合情境信息理论及情景分析方法，探求非常规突发事件的“情景-应对”应急范式中情境重构体系构成及实现途径。在现有研究成果的基础上，本书将界定非常规突发事件情景、情境和情境重构的内涵，建立情境描述研究的理论基础，构建突发事件情境描述和重构表达的模型方法，并对所涉及的关键理论方法和可视化仿真实现技术进行详细研究。本文涉及的研究领域尚缺乏系统性的成熟研究以及较为有效的集成方法。因此，本书研究目的在于：

(1) 厘清非常规突发事件中的情景、情境和情境重构等概念内涵，分析非常规突发事件情境要素的构成，建立非常规突发事件情境描述和情境重构体系。尽管当前对非常规突发事件应急已形成了“情景-应对”方式的共识，但针对这一应对体系中的情景、情境构成要素和相关属性等基础问题还缺乏严格的界定与分析。本研究拟通过对非常规突发事件情景、情境和情境重构等概念内涵的界定，分析非常规突发事件的多阶段情境演化特征，构建“情景-应对”范式中从数据信息集成到情境要素构成分析，到构造情境描述方法，再到形成情境演化网络表现，最后完成情境重构表达的完整体系。为非常规突发事件的情境重构表达研究探索实现途径、流程和模型方法。

(2) 分析非常规突发事件情境要素的多渠道信息来源，提出情境要素的多源信息融合途径和方法，并研究非常规突发事件情境库的建立。在信息融合方法的支持下，建立基于本体情境描述方法，构建因子-状态-事件链的三层情境构成的集成情境网络表达方法。面向情境网络，分析适合非常规突发事件情境重构的描述语言和描述流程。

(3) 在“情景-应对”体系下，提出非常规突发事件情境重构途径和重构流程机制，以情景和情景序偶为事件单元，以包含情景序列的多层次情境网络为表现形式，建立基于模糊情境规则推理和逻辑情境演算算法的非常规突发事件情境重构过程和方法。研究在基础设施关联依赖情境下的重构规则。

(4) 探讨情境网络的可视化表现方法，研究可视化模型的设计思路和网络布局算法，构建非常规突发事件情境重构表达的仿真模拟平台结构及其关键实现技术。

(5) 将非常规突发事件的情境重构体系应用到自然灾害引发的复杂



电网基础设施失效等非常规突发事件分析中，对研究成果形成验证和案例应用。

### 1.2.2 研究意义

本书面向非常规突发事件和中国环境的特定情境，开展探索性工作，丰富“情景-应对”范式的理论研究和实践探索，提供原创性的情境重构表达理论、模型和方法。本研究以适合中国情境的集成化的非常规突发事件应对决策理论形成为目标，具有十分重要的理论和实践意义。

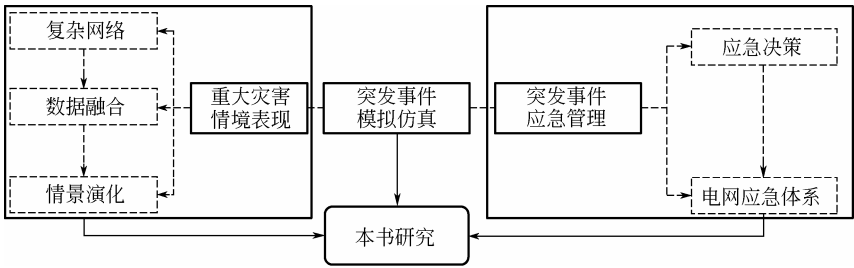
（1）完善“情景-应对”中的系统研究理论，提供情境描述和情境重构的相关实现方法。通过情境重构对非常规突发事件的发生、发展和演化过程进行描述，揭示非常规突发事件系统中事件链式响应行为的过程和事件内部状态的变化过程。预期研究成果将在一定程度上拓展非常规突发事件情境识别的理论研究空间，为应对决策提供基础性的工作，促进非常规突发事件应急管理这一新兴科学研究领域的理论进展。

（2）研究非常规突发事件的情境描述方法有助于为应急准备、预案建立和实时决策等应对过程提供通用性的描述方法，避免不同决策组织的不同决策人员对事件和决策问题认知的歧义性。为“情景-应对”体系中的情境识别等问题提供可操作的研究参考。

（3）探讨情境描述和情境重构的可视化技术可为非常规突发事件决策工具的研究提供参考实现，提升非常规突发事件演练模拟、反馈学习的手段和方法，丰富这一领域的理论联系实际的新途径，提升应急管理决策层对应急指挥客观规律的科学认识。

## 1.3 研究现状及评述

本书的研究主要涉及非常规突发事件应急决策和灾害情境分析两个领域，并选择复杂电网的基础设施级联崩溃作为灾害链的典型破坏情境。因此，如图 1-1 所示，本书将按照应急管理基础性研究、专业角度的应急理论和决策方法、应用系统研究三个层次，围绕如下主题展开相关文献的梳理和评述：突发事件应急管理研究、重大灾害情境及演化分析和重大灾难模拟仿真系统。



◎ 图 1-1 非常规突发事件情境重构相关研究

### 1.3.1 突发事件应急管理研究现状

作为一个新兴的理论研究领域，对应急管理还没有形成一致的严格定义，但普遍认为应急管理是由风险管理发展而来，也是风险管理的高级阶段。现代社会的科技发展与人类生活方式的变革加剧了风险的多样性和风险发生的概率。风险的多样性表现为社会中包含大到各类金融风险、政治风险、大型恐怖袭击风险，小到各类交通事故风险、婚姻家庭风险、食品安全风险等，各式各样的风险随处可见且随时可能发生。根据风险后果影

响程度的由低到高,可以将风险事件分为干扰事件(交通拥堵造成的物流配送延迟、天气原因造成的航班变动等)、危机事件(产品质量造成的企业生存危机等)和突发灾难事件三个层次。其中,干扰事件和危机事件通常可以通过鲁棒计划调节或根据预警及时启动预案等方式进行避免和及时处理,即可以通过干扰管理和危机管理进行控制。而突发灾难事件由于具有灾难影响范围广、破坏程度大、发生突然等特性,很难通过干扰管理和危机管理进行控制。因此,作为风险管理的最高阶段,应急管理由此诞生,并成为新的备受关注的研究领域<sup>[2]</sup>。

应急管理是一项综合研究,包含多学科交叉的理论内容。沿着突发事件应急管理的理论与实践发展轨迹,以下从应急决策研究和电网应急体系两方面综述这一部分的研究现状。

### 1. 应急决策研究现状

非常规突发事件应对决策不同于一般的不确定性决策,它是在危害巨大的突发事件发生后,在情况紧急、时间有限、信息缺失(或短时间内信息海量)而又必须抉择的危急关头做出的决策,即在短时间内收集、处理相关信息,明确问题与目标,分析评价各种预案并选择使用的方案(更多情况下是没有适应性预案或预案执行性较低),组织实施应急方案,跟踪检验并调整方案直至事件得到控制为止的一个动态过程。对决策者而言,应对决策不当的后果将极其严重。这是一个逼不得已而采取应对方案的过程,它本质上是一种极端不确定性决策,是危难之际下为了尽快处置紧急状况而采取的带有权宜意义的处置程序。目前,国内外学术界的相关研究多集中在某一类事件的紧急应对方面,如地震灾害<sup>[3,4]</sup>、洪水灾害<sup>[5]</sup>、恶劣气候<sup>[6]</sup>、核灾害<sup>[7,8]</sup>、传染疾病<sup>[9,10]</sup>、恐怖袭击<sup>[11]</sup>等。大量相关研究集中在类型化的运筹学求解问题。为解决突发事件应对中的专业性决策问题,大多数研

究采用以下过程：追求全面或真实把握危急情境下的致灾因素，构建应对决策模型，优化求解，以期实现及时响应和损失最小化的目标<sup>[12]</sup>。

#### （1）顶层应急决策方案选择

现实中的复杂决策存在事实上的分层决策。应对决策首先应有一个全局性的预防规划，以供实时备用。在重大灾难应急反应的第一时间内，基于预案，研究如何选择可行性的整体决策方案<sup>[13]</sup>。

#### （2）多属性多方案大群体决策

多属性多方案大群体问题广泛存在于网络环境，可以将单方案大群体决策方法推广到基于多属性的多方案大群体决策者，获得大群体偏好矩阵，利用熵权法获得各个属性权重向量，将属性权重向量和大群体偏好矩阵进行合成，获得各方案的综合评价向量，再导出综合排序结果，可以较好地解决多属性多方案大群体问题<sup>[14]</sup>。

#### （3）大规模群体紧急疏散

大规模群体疏散是一个具有网络拓扑约束的典型紧急应对策略优化问题。目前，通常采用以下两类模型：一是简化人员行为约束，采用基于网络拓扑结构约束的网络优化（Network Optimization）方法，研究群体疏散的耗时和路径选择；二是基于马尔可夫链构建紧急状态下的疏散群体行为，研究马尔可夫链模型复杂度和近似求解，比较理想状态与近似实际行动之间的关系<sup>[15]</sup>。

#### （4）应急资源调度和应急物流

这方面的研究问题包括应急物流规划、救援资源调度、救援物资合理储备、路径选择和交通调度、路径恢复等。目前，研究者更多关注重大灾害应对响应中的紧急物资分配送达优化<sup>[16,17]</sup>。其中，典型的应急运输优化问题的解决思路是：构建路径复杂网络，综合考虑时间、路径和车辆因素，

研究物流方案优化选择<sup>[18]</sup>。更多的研究着眼于规划算法，例如，通过构建近似超立方体模型（Approximate Hypercube Model）来解决应急交通调度问题<sup>[19]</sup>。

#### （5）应急出救点

重大灾害发生后，对应急物资的需求增大，需要有多家供应商的供应保证，要求在短时间内确定参与供应的供应商（出救点）及各自承担的供给量。这方面的研究包括：针对一次消耗应急系统和连续消耗应急系统，研究多出救点的组合优化问题，以实现应急活动开始时间最短和出救点数目最小两个目标。连续消耗是指应急活动一旦开始就有物资消耗，并且不能出现因物资供应不足引起应急活动停止<sup>[20]</sup>。典型的连续消耗系统包括连续性应急生产系统、电力供应系统、供暖供气系统等复杂社会系统，是明显受到非常规突发事件影响的系统。

#### （6）应急预案启动时间

在完全没有突发事件持续时间信息的条件下，应该何时启动应急预案是应用预案应急的一个重要问题。可选择的一种方案是：利用援助机制，协调企业应对突发事件的预案启动，以避免分散决策会造成启动预案时间的扭曲<sup>[21]</sup>。

另一些研究是针对突发事件的信息模糊（目标、偏好、属性等的值或权重等）特点，关注应对的模糊群决策模型方法。其中有特点的研究如下。

##### （1）目标选择

通过把模糊集理论与多目标决策方法结合起来。考虑到组织决策中分权的普遍存在和组织层间依靠信息沟通所发生的控制和协调行为，可采用多人两层多目标协调模糊决策模型<sup>[22]</sup>。

## （2）属性设计

基于方案间的赋值级别高于关系，可以得到一种符合决策者偏好的多属性决策分类方法，构建模糊互补判断矩阵；进一步研究建立的基于模糊等式的群体决策方法，将模糊等式转化为线性规划模型，通过求解线性规划模型，得到决策群体关于备选方案集的排序向量<sup>[23, 24]</sup>。

## （3）模糊参数

决策者不能精确定义的参数、概念和事件等都可以被处理成某种适当的模糊集合，由此选择模糊决策模型和算法，例如，带模糊约束的多目标决策模型（模糊目的规划法、模糊全局优化法及模糊交互式规划法）、带模糊系数的多目标决策模型、带模糊系数的多目标线性决策模型、带模糊系数的多目标非线性决策模型<sup>[25]</sup>。

## 2. 电网应急体系

电网是关系到国计民生的重要领域，作为一项基础服务，也是遭受突发事件灾害较多的一个领域。考虑到电网的重要性，多数国家都开展了对电网灾害应急响应处理的研究。其中，较早在这一领域开展研究的代表国家是日本。日本在地理上处于地震多发带，地震是国内常见的一种灾害。同时，地震引发的海啸等灾难也时常发生。为了应对类似事件，在政府主持下，日本已经建立了一整套灾害应急体系，其中就包含了针对电网的应急系统。该系统对大规模电网事故的应急预案、应急救援和应急能力储备等方面都建立了详细的实施规范和操作方案。

欧美国家在政府的引导和资助下开展了相关研究，其中，美国和加拿大的电网应急体系发展得较为成熟。加拿大的公共安全和应急准备部（PSEPC）领导了该国的关键基础设施保护规划，其中就包括了对复杂电网的非常规应急管理内容。美国则主要是由政府引导下的多个部门协同开展

了电网应急的相关工作规划，其中包括北美电力可靠性委员会（NERC）、美国联邦能源监管委员会（FERC）、隶属于美国国土安全部的联邦应急管理署（FEMA）、隶属于能源部的电力输送和能源可靠性办公室（OE）等部门。这些部门共同制定了电网系统非常规应急的主要规划和标准，在实际应用中也起到了良好的效果。

### 1.3.2 重大灾害及其情景表现理论

#### 1. 基于复杂网络的重大灾害研究

对突发事件内在规律的识别，首先要根据事件的各种外在表现形式、特征和发展趋势及可能的影响进行分析整理，构造出对事件情景和动态情境的描述。通过对情景和情境的分析，可以对事件未来的发展趋势进行预测。“情景(Scenario)”一词最早出现在 1967 年 Kahn 和 Wiener 合著的《2000 年》一书中<sup>[26]</sup>，他们认为：未来是多样的，几种潜在的结果都有可能在未来实现；通向这种或那种未来结果的途径也不是唯一的，对可能出现的未来以及实现这种未来结果的途径也不是唯一的，对可能出现的未来以及实现这种未来的途径的描述构成一个情景。可见，情景是对事物的未来发展途径及发展态势的描述，既包括对各种态势基本特征的定性和定量描述，同时还包括对各种态势发生可能性的描述<sup>[27]</sup>。

非常规突发事件面对的是一个庞大、复杂的系统，事件的阶段性状态及发展过程受到众多方面因素的影响。这些因素涵盖了与突发事件紧密相关的地理和人文环境、组织结构、设施及分布、信息知识等，上述多种因素及相互之间的复杂关联共同构成了突发事件的复杂情境。根据复杂网络方法的研究思路，如果将情境中的构成元素作为节点，元素之间的关系视为连接，可以形成复杂网络。为保证网络节点的单纯性和一致性，可以将

情境要素按组织要素、设施要素、信息知识要素等分类，将每一类要素构成的网络进一步集成，就形成了多个复杂网络集合而成的复杂网络（超网络）<sup>[28]</sup>。借助网络分析方法，从网络拓扑结构角度对突发事件自身及事件之间的关联进行分析，从而得到事件演化等内在规律。以下从网络拓扑表述和关联分析角度总结相关研究现状。

### （1）基础设施网络的普适性研究

关键基础设施是非常规突发事件中最为常见的主要承灾体。本书研究的自然灾害类非常规突发事件所涉及的关键基础设施包括电力、电信、交通、水供给与水处理、石油与天然气、医院和医疗系统、银行与金融系统、紧急响应部门等。目前，基础设施网络研究大多是以普适性为目标，即针对关电网、供水网、供气网、交通网、通信网等网络的一些共性特征，多采用复杂网络模拟的方法。典型的研究内容和成果包括：考虑网络节点的自修复功能、灾害蔓延机制和内部随机噪声的灾害蔓延动力学模型，研究自修复因子、延迟时间因子和噪声强度三个重要特征参数对三种网络（随机网络、无标度网络和小世界网络）节点修复率和崩溃节点数的影响<sup>[29]</sup>。存在冗余的基础设施网络系统可以延缓灾害的蔓延过程，并争取更多的应急补救时间，说明基础设施的网络差异可以导致蔓延过程的差异<sup>[30]</sup>。

### （2）电网

电网的重要性不言而喻，因此对电网网络结构的研究较多。研究中普遍采用将现实的电力供应节点（变电站、水电站等）作为网络节点，将电力传输线路定义为网络的边，将线路上的传输效率（阻抗等）作为线路权重，形成无向有权网络。研究方法是构建电力节点与传输线路构成的网络拓扑结构，研究平均传输距离、衡量节点的脆弱性和鲁棒性，描述并分析电力基础设施系统各组件之间失效的连锁效应<sup>[31]</sup>。



### （3）交通路网

对于交通路网，研究中多采用将道路交叉口视为节点而将道路视为网络边的拓扑构造方法，将车辆在道路上行驶所花费的行驶时间对应于边上的权重，构造出复杂加权交通网络。通过确定拓扑结构对交通承载能力的影响，研究影响交通的关键性道路节点和交通鲁棒性，并寻找识别交通瓶颈和疏解拥堵的控制策略<sup>[32]</sup>。基于开放道路网络的特征，有学者提出新的对象聚类方法（基于边和基于节点的聚类方法）及其算法，利用网络中节点和连边的信息来缩小搜索的空间，通过避免不必要的距离计算来提升效率。实验结果表明，算法对于真实道路网络中的对象聚类是高效的<sup>[33]</sup>。另一种方法是通过在路网中引进网络平均距离、节点度分布及簇系数等概念，研究城市路网映射后的复杂网络特征，进而尝试运用复杂网络理论探讨城市路网可靠性，进行路网选择性攻击和随机失效条件下的可靠性仿真分析，其结果表明路网展现出完全不同的鲁棒性<sup>[34]</sup>，为交通路网的应急修复策略等研究奠定了基础。

### （4）组织网、信息网和知识网

突发事件应对的主体通常是各类应急组织，组织之间的信息流动和知识的传递也是应急决策效果的一个决定性因素。现有研究中，主要通过对组织网络的异质性、复杂组织网络的无标度行为、复杂组织网络的演化等方面进行探索<sup>[35]</sup>，将组织中的单元或团队抽象为网络节点，将组织单元或团队成员之间的互动关系抽象为网络的边，构造出立体多核（关键组织）来剖析组织网络结构及其内在嵌入机理<sup>[36]</sup>。将组织视为知识主体，通过分析组织（知识主体）之间的映射，可以形成两种知识网络模型及一个统一的集成加权超网络模型<sup>[37]</sup>。单纯的信息网研究多采用将信息源（路由器、页面、社区用户）建立为网络节点，将信息源之间的联系建立为边的方

法构造网络拓扑结构。在信息网络内部存在大量的逻辑结构和虚拟社区现象，可以用于分析信息拥塞机制，优化信息传播<sup>[38]</sup>。

### （5）多网络关联分析及超网络集成

将上述各种分类网络进行集成，建立包含多种子网络的高层网络结构，就形成了多网络集成的研究思路。目前的研究主要从系统动力学、网络控制等层面研究网络演化规律和优化控制<sup>[39,40]</sup>。有学者围绕如何分析网络各组成部分之间以及网络和网络之间的关系的方法，在交通分析<sup>[41]</sup>、互联网应用<sup>[42]</sup>等方面进行了超网络的探索性研究。已有的研究成果表明，模拟基础设施网络间的传播情况，可以得到基础设施系统的网络模型描述规则和关联响应因子，以比较基础设施网络在随机失效和蓄意攻击下关联因子的变化。例如，美国桑迪亚国家实验室开发了一个包括国家电网、石油和天然气系统、无线电通信，以及内陆水网之间相互连接的元模型，用以分析上游设施失效造成的下游设施的连锁反应<sup>[43]</sup>。研究中，需要针对具体突发事件建立连锁反应网络模型，普遍采用的模型建立过程为：收集突发事件案例；把每一例突发事件抽取为单一的节点；若一个事件的爆发引起了另一个次生事件，则两个事件之间建立连边；构建突发事件的连锁反应网络模型。这一类连锁模型可以提示决策者所面临的连锁反应路径及危害程度，使其对可能发生的各种连锁反应事先有一个充分的估计，并做好应急准备，选择最佳应对策略<sup>[44]</sup>。

## 2. 重大灾害情景演化研究

对突发事件内在规律的识别，首先要根据事件的各种外在表现形式、特征和发展趋势及可能的影响进行分析整理，构造出事件的情境描述。通过对情境的分析，可以对事件未来的发展趋势进行预测，从而对不确定性问题给出确定性方案。情境既包括对各种情景态势基本特征的定性和定量

描述，同时还包括对各种态势发生可能性的描述<sup>[45]</sup>。情景规划是研究中常采用的一种方法，它最早起源于美国军方的曼哈顿工程。当时，为了研究预测原子弹爆炸后可能产生的后果，科学家们利用计算机对爆炸后的不同情景和发展态势进行了模拟。很快，情景规划从单纯的军事领域应用进入商界的研究中。首先采用情景规划进行商业研究的是美国的兰德公司（RAND Corporation），之后不久，兰德公司的赫曼·卡恩（Herman Kahn）对情景规划进行了详细的诠释，将此概念和应用进一步发扬光大。与情景规划紧密相关的分析方法称为情景分析方法（Scenario Analysis），最早用于战争博弈分析。情景分析方法通过想定一系列未来情景以及对相关动因的分析，以帮助决策者制定出灵活有效的行动方案。情景分析的过程是一个拓宽研究者思路以考虑多种可能性的结构化的过程框架，有其特有的分析程序，将专家的知识经验融入其中，产生以前未曾想到的情景。在这一体系中，需要构建相应的情景表现、情景识别、情景构建、情景分析、决策优化等方法。与传统的预测方法相比，情景分析法注重事物发展的多种可能性、动态性、系统性和高智能性，将决策失误对预测造成的影响大大降低，对未来发展战略制定的可参考性更强。由此，情景分析被认为是探讨和制定未来发展战略、对策、规划、政策措施的比较有效的方法，在国际上被广泛应用于经济、能源、环境、社会、军事等领域。总体来看，国内外对情景分析法的理论研究侧重于对情景、情景分析、情景分析过程等基本概念和方法的研究，如 Jutta 和 Martin 提出利用 JPT 表（Joint Probability Table）来减少不一致性现象，从而有效地获取专家知识；还有专家在情景分析基础上引入概率理论，提出交叉影响确定情景概率技术方法对专家知识进行处理的定量分析模型。将情景分析应用到人工智能领域，产生了情境演算这一方法及其广泛应用。“基于模板的规划”方法（Planning with

Templates)是属于情境演算的一种方法。所谓模板,是指用于解决某类典型问题的标准化操作步骤,并作为解决新问题的出发点<sup>[46]</sup>。主要的模板包括键值模板、标记主题模板、基于逻辑的模板、面向对象模板、图形化仿真模板和基于本体的模板等,其选择依据主要考虑到情境特殊性与数据结构的不一致关系<sup>[47]</sup>。研究者尝试各种方法以支持情景分析方法适用于描述实际问题。例如,在情景分析基础上引入概率理论,提出交叉影响确定情境概率技术方法对专家知识进行处理的定量分析模型。可以利用情景分析来提供拟实时情景模拟。模拟出拟实情境需要通过情境匹配的方法与真实情境进行比较和替代。情境匹配是模拟者期望情境与拟实情境之间完成匹配过程,通过计算时空、任务和活动等情境要素的相似度,再加权计算匹配结果<sup>[48]</sup>。

情景认知(Situation Awareness)方法同样源自军事行动领域的研究。其核心思想是:在特定的时间和空间内对环境中各种要素的知觉,构建对其意义的理解,针对可能的灾难情景规划其后续状态。军事行动时间弹性很小,行动后果生死攸关,行动中采用情景认知方法已有成功的验证。对于自然灾害、事故灾难而言,情景认知和情景识别的难度更为巨大。如何构建解决由知觉环境中的元素到理解现实情景再到预知规划未来状态的工作机制,以避免情景意识错误(不能准确地知觉情景;不能正确地理解情景;无法合理规划控制情景变化),这是基于情景的非常规突发事件应对模拟研究需要解决的核心科学研究问题之一。

一些自然灾害,特别是强度较大的自然灾害,在情景的形式和关系上存在一些共性。其中比较明显的一个共性是它们在发生和发展过程中常常诱发出一系列次生灾害和衍生灾害。这种灾害成串出现的现象称为灾害链(Chain-Styled of the Disaster, STD)。灾害链反映了灾害的成因联系,例如,

台风-暴雨-洪涝-滑坡,地震-火灾,洪涝-农作物病害等。灾害链是非常规突发事件的一种主要表现形式。灾害链是将宇宙间自然或人为等因素导致的各类灾害,抽象为具有载体共性反应特征,以描绘多灾种的形成、渗透、干涉、转化、分解、合成、耦合等相关的物化流信息过程,直至灾害发生给人类社会造成损失和破坏等各种连锁关系的总称<sup>[49]</sup>。灾害链是一种灾害启动另一种灾害的现象。所谓启动是指前种灾害为致灾的部分原因(主、次、诱导或触发、外部等)。这里,我们称前种灾害为启动灾害链环(以下简称启动灾环),后种灾害为被动灾环,即灾害链至少由两种或以上灾环组成。灾环也是一种灾害,但它是构成灾害链的单位;而灾害不一定发展成灾害链,它可以单独存在。被动灾环又可启动他种灾害,即多级启动。被动灾环可以是地质、水文、生物和人类社会的一种或多种灾害。在自然灾害综合研究方面,根据我国学者所做的工作可以看到,有关自然灾害的研究由单类推向综合,出现了自然灾害系统和灾害科学体系的研究新观念,描绘了我国的分区灾害链<sup>[50]</sup>。经过数十年的体系研究,我国学者提出一系列灾害科学体系研究,深入探索灾害系统的性质、动力学机制、综合减灾范式、应对防范巨灾等方面,阐述了对“区域灾害系统”作为“社会生态系统”“人地关系地域系统”和“可划分类型与多级区划体系”本质的认识,区分了“多灾种叠加”与“灾害链”损失评估的差异,获得了丰硕成果<sup>[51~55]</sup>。史培军<sup>[51,52]</sup>提出了由“致灾因子、承灾体及孕灾环境共同组成的灾害系统”的概念和灾害链理论,指出灾害系统的要素包含了上述几个方面的详细因子,描述了推动灾害发生、发展的系统性因素。周秉荣等<sup>[56]</sup>通过对降水、低温、积雪等气象因子的分析,研究了雪灾中气象因子与灾害环境、受灾对象等要素之间的相互作用和关系。另外,也有学者从事件的变量和因素角度分析了对事件的相关影响因素<sup>[57,58]</sup>。

在灾害事件描述研究中,总体上可以分为形式化语言方法和图示化方法,以及两者相结合的研究方法。在形式化层面,产生了基于规则策略<sup>[59,60]</sup>、基于系统状态<sup>[61,62]</sup>、基于时间序列<sup>[63]</sup>、语言技术角度<sup>[64,65]</sup>、事件序列及图示化<sup>[66]</sup>。在图示化描述层面,发展了 petri 网<sup>[67,68]</sup>的应用,应急领域的其他图示化应用<sup>[69,70]</sup>。综合来看,部分研究中的描述模型借鉴了离散动态系统描述模型,包括排队网络模型、有限自动状态机、序贯联系过程、马尔可夫链及广义半马尔可夫链、有限递进过程、综合仿真模型等。它们的共同局限是在描述上都没有充分直接体现事件情境的基本特征和基本参数,也未能有效地解决情境的实时性与事件的并发性等问题。在演化描述研究方面,范海军<sup>[71]</sup>等人采用数学方法,从灾害的链式结构角度对自然灾害系统进行了分析,用数学模型分析了在外部因素和内部结构共同作用下的灾害链式复杂响应过程。季学伟<sup>[72]</sup>等人运用基于演化动力学风险评估方法、基于指标体系风险评估等方法针对关注的事件链进行定量的风险评估。李藐<sup>[73]</sup>提出了事件链的概率模型。李湖生<sup>[74]</sup>重新划分了事件多阶段的分析理论。在洪水灾害领域,韩传峰等<sup>[75]</sup>以黄河中下游为研究对象,用系统动力学方法进行模拟仿真,研究了自然灾害的链式反应机制。

### 3. 数据融合/集成方法及模型

非常规突发事件系统中的数据种类繁多,来源复杂,涉及各类数据库、文档、普通文件、半结构化信息等。数据处理是事件情境描述和重构的核心前提和重要步骤,其核心任务是将上述关联的分布式异构数据源融合、集成到一起,供应对决策系统和用户透明访问。当前数据集成的难点主要表现在数据的异构性、分布性和自治性等方面。现有的研究方法和成果包括:

#### (1) 数据集成方法

通常采用的集成方法包括模式集成法<sup>[76]</sup>和数据复制方法。模式集成法

也称为虚拟视图法，主要通过构建全局模式与数据源数据视图间的映射关系；处理用户在全局模式基础上的查询请求。目前采用这一方法的两种典型形式是联邦数据库和中间件集成。前者是采用紧密耦合联邦数据库系统<sup>[77]</sup>，利用统一的全局模式，将各数据源的数据模式映射到全局数据模式上，从而解决数据的异构问题。其缺点是向全局数据模式映射的算法复杂，可扩展性差。后者是中间件集成方法<sup>[78]</sup>，虽然也同样使用全局数据模式，但中间件系统不仅能集成结构化的数据源信息，还可以集成半结构化或非结构化数据，因此在数据集成能力上有所增强。其缺点是其结构决定了对数据操作常常只能提供读取而不能提供数据写入操作。与模式集成法不同，数据复制方法，即将多数据源的数据复制到相关数据源上，从而提供集成性能。其中比较典型的是数据仓库方法<sup>[79]</sup>，将多源数据复制到数据仓库中供用户访问。该种方法的缺点是数据复制过程非常复杂，并且需要制定各种条件控制目标数据和源数据之间的同步问题。

### （2）电网数据融合

在应用层面上，国内在电网数据融合上建立了比较多的应用。国家电网公司在系统安全防护框架的基础上，提出了省级以上调度系统数据整合方案<sup>[80]</sup>。上海电力工程从面向电网整体的生产管理角度出发，在实时监控、输配电管理、电力营销等业务系统之上，通过建立一体化公共信息模型，实现了电网设备参数、电网网络拓扑、地理信息、用户信息、用户信息、实时信息的共享访问<sup>[81]</sup>。我国南方的部分电网公司也较早地实现了集数据、模型、图形等议题的综合数据集成平台<sup>[82]</sup>。

### （3）关系数据模型及扩展

University of Michigan Dearborn 采用关系数据模型开发 CORDS 系统，该系统实现了对多个异构关系数据库的集成<sup>[83]</sup>；中国科学院软件研究所在

1999 年开发的 IS-Global 系统实现了关系型多数据库系统集成<sup>[84]</sup>；AT&T Bell 实验室采用扩展关系数据模型开发出 Information Manifold 系统，对万维网上的结构化信息源进行集成<sup>[85]</sup>。

#### （4）面向对象数据模型

惠普实验室数据库技术部采用面向对象数据模型开发 Pegasus 系统，能集成本地和外部的多个自治数据库<sup>[86]</sup>；东北大学提出了面向对象的信息集成系统 SCOPE/CIM<sup>[87]</sup>；意大利 Universit a di Roma Tre 研究小组在开发的 ARANEUS 系统中提出的面向 Web 页面的模型 ADM 都是基于 ODMG 的面向对象的数据模型；德国 GMD-IPSI 的 KODIM 开发的原型系统 ViewSystem 中采用的数据模型是典型的面向对象的数据模型<sup>[88]</sup>。

#### （5）基于有向图的数据模型

美国斯坦福大学数据库研究组开发出著名的 TSMMIS 异构信息源集成系统，该系统中采用了基于有向图的自描述数据模型 OEM；东南大学 Versatile 项目提出了基于有向图的 OM 数据模型，在定义 OM 对象模型的基础上，提出了 OM 对象代数；华中科技大学 Panorama 项目提出了一种基于 XML 的 XIDM 模型集成数据模型；路燕等<sup>[89]</sup>提出了一种新的 Web 数据模型，采用直观自然的图结构，将 WWW 表示为有标注边的有向图，该数据模型能同时支持 XML 和 HTML 文档等半结构化数据建模；金海等<sup>[90]</sup>提出了基于本体标记表达异构数据模式的语义模型，并利用语义模型对非结构化的医学图像网格信息进行集成。

#### （6）动态的不确定性数据集成模型

申德荣等<sup>[84]</sup>提出了一个面向多领域的、支持动态数据集成方法及数据库的网格系统，采用一种 P2P 多 Chord 网格体系结构，实现数据资源的分布存储、查询处理和动态数据集成；Green T J.等<sup>[91]</sup>对不确定性的数据建立



了可能世界数据模型，在该模型中，各元组的任一合法组合均构成一个可能世界实例。

### （7）其他数据集成模型

刘伟和孟小峰等<sup>[85]</sup>提出了一个 DeepWeb 数据集成的系统架构，依据这个系统架构对 Deep Web 数据集成领域中若干关键研究问题进行了阐述和总结。金蓓弘等<sup>[88]</sup>对实时数据的集成技术进行了研究，提出了面向消息的中间件的分布式体系结构和相关的实现技术，采用全局模式并通过模式转换和模式集成屏蔽了实时数据库的异构性。

## 1.3.3 灾害模拟仿真系统研究

灾害模拟仿真系统是对已有理论研究成果的验证和再现，在灾害应急的预防准备和演练、反馈等阶段都具有重要的作用，现有的研究成果如下。

### （1）多技术集成应用的模拟系统

Xu<sup>[92]</sup>采用一个集成了 GIS、CAD 和虚拟现实技术所开发的的城市地震模拟系统，模拟了城市建筑抗震和人群在地震中的行为<sup>[93]</sup>。文献[94]采用将 Grid 和 HLA 技术结合形成的分布式模拟仿真框架，构建一种灾害响应过程训练系统。Uno<sup>[95]</sup>基于 Agent 和地理信息系统所构建的灾害应急疏散模拟系统，通过对建筑损毁和人员损伤的评估，模拟了合适的疏散路线。

### （2）基于 GIS 的洪灾模拟系统

将 GIS 技术应用于洪灾模拟，形成了三维动态行驶的洪水模拟系统<sup>[96]</sup>，形象地展示了灾难在立体空间中的演化过程。该系统的三维技术缩短了决策用户全方位了解灾害情况的时间，提升了决策的效率。

### （3）探索与实用并行的模拟系统

就电网系统而言，国网电力科学研究院研发的电力市场及电力系统动态交互仿真平台（PMP SDS）是一个兼顾支持研发和适用演练的模拟系统。江苏省电力公司等电力网企业已经将这一系统并入其广域防御平台<sup>[97]</sup>。

### （4）关注演练的模拟系统

模拟演练系统注重为实际运行指挥人员提供模拟平台。这类平台既可以验证应急预案的可实施性并进行修正，也能够训练相关人员的应急能力。例如，针对相关应急物资和人员调度问题的综合演练系统，针对特定的应急场景，对某个或多个突发性的灾害事件引发的电网停电状态，利用预先编制好的应急预案进行电网恢复和调度仿真、应急物资调度、应急人员与车辆调度的模拟<sup>[98]</sup>。

## 1.3.4 研究述评

综合来看，过去学者多从地理学（包含地质学和气象学）和社会学（包含社会心理学和社会行为学）两个学科的角度去研究灾害成因和灾后缓解，但现在有更多学者已经意识到，除涵盖上述两个学科的交叉之外，应急管理研究更应涉及管理学、信息科学等更多学科的交叉，且涵盖学科的数量会随着社会机制的发展和人类认知水平的提高而不断增加。从近两年来我国重大灾害事件的应对来看，我国的应急管理已经取得了瞩目的成绩，尤其是在应急动员、应急指挥组织等方面具有特殊的优势，但在理论研究上仍然暴露出一些不足，具体体现在以下几个方面。

### 1. 在应急决策研究方面

（1）现有研究成果主要涉及地震、洪水等自然灾害和核事故等事故灾害的实际应对决策，为非常规突发事件的应急管理决策研究提供了基础性

的研究成果。研究者更多关注突发事件应急决策算法。

(2) 目前, 较多的应对决策研究都设定(或隐含)一定假设条件, 而研究者却多未给出其合理性的解释(例如, 对疾病传播模型中常常假设感染者恢复后即具有终生免疫能力)。

## 2. 在重大灾害及其情境表现研究方面

(1) 在基础设施网络的出错和遭袭研究方面, 大多数研究出发点基本立足于探讨网络的稳定性与脆弱性层面, 对基础设施网络的级联崩溃机制和测定的研究目标仅限于一般性的规律探讨。如何在相对普适的理论研究基础之上, 使这些理论成果成为可以用于实践工作的支持工具, 对这一问题应给予更多关注。

(2) 在关键基础设施研究领域, 有关研究主要面向某一类基础设施网络, 基本上均为一类网络研究方法, 较少关注关键基础设施复合网络的整体系统性, 在多个网络之间的集成化研究方面尚存较大空间。在研究方法上, 针对网络之间关联影响分析, 仅是在经济学基础之上的依赖关系研究, 也是普适类的研究, 无法支撑非常规突发事件复杂情境的具体描述和分析需求。

(3) 对于非常规突发事件应对这样一个复杂巨系统而言, 其相关复杂网络的层次之间、级别之间关系有待揭示。如何由多类基础设施网络构建一个集成的复杂网络(或简称超网络), 如何利用超网络去研究跨网络的节点映射和边映射, 用以描述跨网络的相继故障, 是一个较为困难而又可能有效的解决问题的思路。

(4) 在情境演化研究领域, 基于情境的分析方法在重大突发事件应急管理领域尚未形成独特的、成熟的描述和分析体系。从情境分析关注的时点看, 当前有关情境的研究要么驻足过去, 要么关注未来, 其中以关注未

来为重,缺乏对从历史情境到未来情境的演变规律的研究,而对突发事件实时决策的指导性不充分,难以形成连贯的体系。演化分析方面的研究多为在单因素致灾论下的单类型指标的演化分析,有一定的局限性。并且,对于演化过程中的描述和分析结果,由于缺乏通用性的描述语义和方法,使得人们的认识存在模糊性,导致不同的部门、群体得出完全不同的灾害评估和抗灾措施。现有研究未能充分反映突发事件在自然特性和应急措施的综合作用下的演化分析,从而在应急响应的定量分析与评价等方面还缺少进展,而模糊数学模型在这一方向的优势应该被有所应用。

(5) 在数据集成的相关研究方面,已经在集成方法和现实应用层面取得了很多的成果。但对于多源异构数据集成的完整性、一致性和实时性,尤其是在类似电网应急恢复等对时间要求极为苛刻的应急反应中,还需要深入研究提高数据集成性能、建立应用标准。数据模型及集成方法只是对某一种数据类型的数据集成,无法解决非常规突发事件的多数据类型、多数据源的集成和融合问题。前述的数据集成模型只是把提取的数据集成在一起,对数据的重要性、充分性和不确定性没有加以考虑。在非常规突发事件的有些场景,数据是海量的,这对数据存储和集成是灾难性的,这些数据集成模型无法有效地对数据进行归类、约简,无法进一步提取决策者关心的重要情况和事件信息。

### 3. 在灾难模拟仿真研究方面

(1) 在面向高层架构(High Level Architecture, HLA)仿真架构和 Agent 仿真应用方面的研究都取得了广泛的研究成果。也有一些研究开始关注 HLA 和 Agent 的结合在仿真中的应用,但大多集中在两者结合的框架设计和流程上,对于仿真系统的应用设计还缺乏机制和可操作层面的研究。例如, Agent 的自主通信和 HLA 中联邦通信协议的集成、Agent 的多回合协

商机制与 HLA 周期规范的有效结合、Agent 通信原语和 HLA 的通信内容的编码转换等问题还需要设计与验证。

(2) 目前, 计算实验理论研究多在形式化的建模方面, 研究重点放在单纯的计算机系统模拟上, 而在基于智能代理的系统和真实系统之间的平行互动关系方面的研究进展较小, 这样就影响了仿真系统对现实系统的指导作用。对于非常规突发事件应对决策, 不存在平时的真实性系统。如何构建仿真执行系统成为这一领域的难题。

## 1.4 本书研究内容采用的研究方法和 技术路线

---

### 1.4.1 研究方法

非常规突发事件的情境描述和情境重构研究涉及社会、技术、管理、信息等多个学科领域, 研究中需要融合多学科理论和方法。本文将综合采用灾害理论、情景分析、信息融合及计算机仿真模拟等综合模型和技术, 整体研究方法如下:

(1) 借鉴“预测-应对”模式中的相关应急管理研究方法, 采用系统理论, 分析情境重构表达的相关因素, 界定情景、情境和情境重构等概念内涵, 分析情景与情境之间的关联关系; 定性分析非常规突发事件的演化机理和特征, 研究非常规突发事件的情境描述和情境重构表达体系的构成。

(2) 采用信息科学的相关方法, 分析非常规突发事件系统中的信息来源和构成, 研究多源信息的融合方法; 运用灾害链理论和情景分析方法,

分析非常规突发事件系统中的情境要素的构成，研究利用历史案例信息和实时事件信息构造事件情境的形式化表达和网络构造。

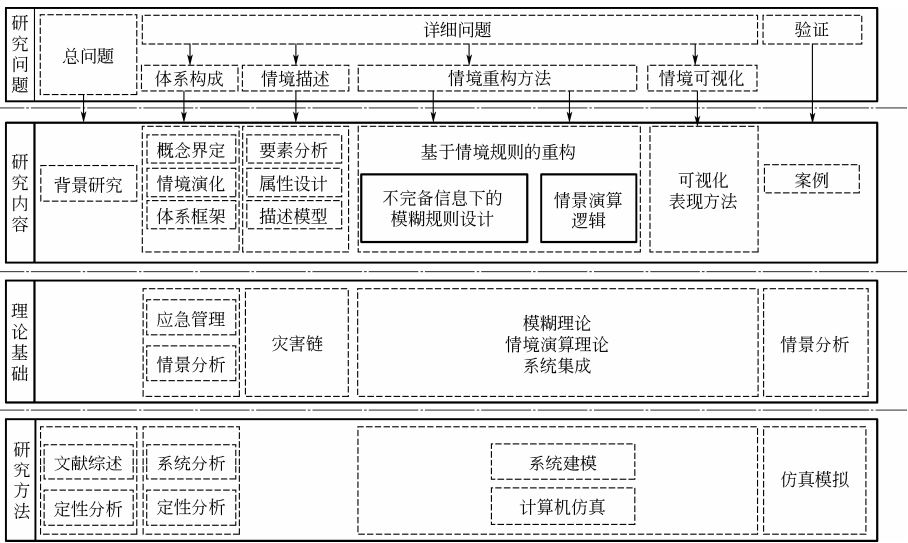
(3) 结合图论和规则推理的理论方法，研究非常规突发事件情境重构体系的途径、流程和实现方法。

(4) 采用计算机技术，研究情境网络可视化仿真的表现方法和需要的拓扑及整体网络布局算法。

(5) 采用理论与实际相结合的研究方法，研究情境描述和情境重构表达在复杂电网破坏中的应用实例，为复杂电网的非常规突发事件应急管理提供应用验证。

1.4.2 技术路线

图 1-2 描述了本书研究的技术路线。在界定了非常规突发事件“情景-



◎ 图 1-2 本书研究的技术路线

应对”模式下的情境演化和情境重构问题、总结相关研究成果的基础上，借鉴情景分析理论，应急决策理论，以及灾害链理论等相关学科的研究成果，首先研究非常规突发事件情境演化和情境重构体系构建，建立由信息到情境构成要素，到情境描述，再到情境演化，最终实现情境重构的研究框架，提出情境重构体系的关键途径，对情境表达要素和描述方法、多源信息的融合、情境重构方法和可视化仿真技术等关键问题进行深入分析，从而全面展开本书研究。

## 1.5 研究内容与研究框架

---

### 1.5.1 主要研究内容

非常规突发事件的情境重构过程是指根据非常规突发事件的实时信息和可参考的历史信息，构造事件情景和多层次情境，并通过重构情境层次和情景序列展现事件发生、发展的过程。情境重构是辅助决策者了解非常规突发事件状态，掌握事件演化过程的重要方法，是“情景-应对”范式中的重要基础组成部分。本书的主要研究内容包括：

（1）建立非常规突发事件情境重构体系。界定非常规突发事件情景、情境及情境重构等基本概念内涵和关联关系，分析非常规突发事件的情境构成要素和要素特征属性，研究非常规突发事件中的情境演化的特征和内在机理，从而确认非常规突发事件情境重构表达需要解决的问题和相关实现途径，为后续深入的研究奠定体系基础。

（2）分析非常规突发事件中的信息需求，研究非常规突发事件中多源

异构信息融合的相关方法和情境案例库的建立；构造事件情境的形式化抽象表达，研究基于情景序列和情境网络的非常规突发事件情境描述方法，选择适合非常规突发事件情境描述和情境重构表达的描述语言并构建描述流程。

(3) 研究非常规突发事件情境重构表达的途径和流程，并研究在信息不完全的情形下，以情景和情景序列为事件单元、以包含情景序列的多层次情境网络为表现形式，通过情境规则推理和逻辑情境演算算法进行情境重构的模型方法。并研究在基础设施关联依赖情境下的重构规则的建立和描述。

(4) 研究情境描述及情境重构表达的可视化实现的任务、模型和相关算法，设计面向 GIS 服务接口的原型系统，支持对非常规突发事件情境重构表达模拟仿真的进一步研究。

### 1.5.2 研究范围界定

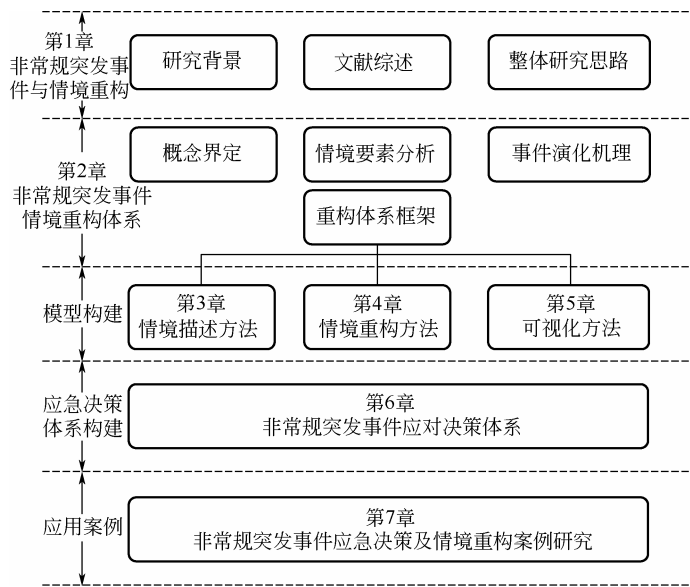
(1) 根据中国政府应急管理网站及《国家突发公共事件总体应急预案》中对突发事件的定义，突发事件分为四种类型：自然灾害、公共卫生事件、社会安全事件和事故灾害。各类突发事件的发生、发展机理不尽相同，需要区别对待。本书主要以自然灾害这一类非常规突发事件为研究对象，并且根据行文需要，有时以“突发事件”或“事件”等名词来指代大规模自然灾害类的非常规突发事件。

(2) 本书中有关数量的表述中，“以上”含本数，“以下”不含本数。

### 1.5.3 研究内容框架

本书的研究内容框架如图 1-3 所示。全书分为 4 个层次共 7 章，各章的主要内容如下。





◎ 图 1-3 本书的研究内容框架

第 1 章 非常规突发事件与情境重构。介绍本书的核心研究问题、研究目的及意义，通过分析非常规突发事件“情景-应对”这一应对范式的动态情境特征，提出面向非常规突发事件的情境分析和情境重构这一科学问题；对相关文献的研究现状进行评述，继承现有研究成果并确定本书的主要研究内容；针对研究问题的现实需求和现有研究的薄弱环节，界定本书的研究内容；确定本书采用的研究方法和路线，最终构建出本书的研究框架。

第 2 章 非常规突发事件情境重构体系。界定非常规突发事件情景、情境及情境重构等基本概念内涵和相互之间的关联关系。从情境输入、情境驱动和情境输出三个层次分析非常规突发事件情境构成要素。借鉴系统科学中的系统动态理论，从突变理论和生命周期理论集成角度分析情境演化的内在机理，在此基础上，分析在信息不完全情况下的非常规突发事件情境重构

体系的目标和内容,构建基于情境的非常规突发事件情境重构体系。

第3章 非常规突发事件情境描述方法。研究非常规突发事件系统中多源信息的融合方法,从数据集成角度为情境描述建立基础。分析典型的非常规突发事件的情境构成要素,结合集合论和图形化方法建立情境及情景序列的形式化表达,从静态情境网络结构描述和动态时空演化过程描述两个角度,构建突发事件描述路径和情境描述方法和过程,进而为事件的重构表达研究提供描述基础。

第4章 非常规突发事件情境重构方法。分析非常规突发事件情境重构的实现途径、流程和方法,研究信息不完全的情形下,以情景和情景序列为事件基本单元、以包含情景序列的多层次情境网络为表现形式,通过模糊情境规则和逻辑情境演算算法进行情境重构表达的模型方法。

第5章 非常规突发事件情境重构可视化方法。分析情境网络和情境重构可视化的目标任务,建立可视化模型的基础图元和相关的可视化要素,研究相关情境描述及情境重构表达的可视化模型,设计计算机模拟仿真的可视化表现算法。建立并完善面向地理信息系统的情境重构仿真系统。

第6章 非常规突发事件应对决策体系。研究在巨灾的灾难情景规划、应对准备规划、应对任务规划和关键基础设施容错设计等要素领域,构建巨灾应对建模方法的可借鉴研究基础。提出非常规突发事件应急决策体系的概念性框架。

第7章 非常规突发事件应急决策及情境重构案例研究。根据本书提出的情境描述模型和情境重构表达方法,分析非常规突发事件情境重构在复杂电网中的应用方式和方法,验证本书提出的模型和方法的适用性和有效性。



## 第 2 章

# 非常规突发事件情境重构体系

- 2.1 概念界定
- 2.2 非常规突发事件的特征及典型情境
- 2.3 非常规突发事件情境重构体系框架
- 2.4 非常规突发事件的情境要素
- 2.5 非常规突发事件的情境演化机理
- 2.6 本章小结



非常规突发事件的次生衍生灾害危害严重，且缺失发生前兆、难以预测，发生、发展和演变的事件过程及内在机理相对复杂。“情景-应对”需要建立在对突发事件情境的有效识别和动态描述基础上，不仅需要构造基于历史事件、经验规则的案例事件情景用于应对准备，同时更需要在事件发生后实时构造事件整体情境及动态情景以支持应对决策。因此，无论是从应对准备角度，还是从实时应对角度，研究非常规突发事件“情景-应对”模式下的情境描述与情境重构体系都具有现实意义。本章将界定非常规突发事件情境重构机制中的主要概念，研究情境要素构成，分析非常规突发事件情境特征和演化机理，为基于情境的非常规突发事件情境重构表达建立体系框架。

## 2.1 概念界定

---

### 2.1.1 非常规突发事件情景与情境

人类对灾害的应该方式主要是“预测-应对”，也是较为传统的风险管理模式，该模式更注重从风险因素的角度进行预防和预测，对常规性灾害等突发事件的应对效果较好。而非常规突发事件由于具有历史罕见性、突然爆发性、致灾因素的复杂性、极度破坏性、时效紧迫和极端不确定性等特征，对其进行预防和预测的难度极大。从现有技术、成本等角度来看，对非常规突发事件提前进行预测几乎是不能实现的。因此，对非常规突发事件只能在其发生后进行快速响应决策。而事件一旦发生，决策者所面临的将是无预案或者预案基本失效情况下的紧急决策状态，因此应对处置应

更加关注事件爆发后的情景依赖决策。从“预测-应对”到“情景-应对”的转变，不仅仅是应对范式上的转变，更是突发事件应急管理在应对意识上的一次转变。“情景-应对”模式建立在对非常规突发事件情景、情境等概念的深刻认识基础之上，需要分别面向历史、拟实及实时情境建立情境描述。因此，事件情景和实时动态情境是应对准备的前提，更是应对决策的基础和依据。有必要首先对这一应对模式中的相关概念进行清晰而明确的界定。

关于情景，在不同应用领域中对这一概念均有涉及。其中，Kahn 和 Wiener 认为：未来是多样的，多种潜在的结果都有可能在未来实现；通向某种未来结果的途径也不是唯一的，对可能出现的未来以及实现这种未来的途径的描述构成一个情景<sup>[26]</sup>。由此可见，情景是对事物的未来发展态势及发展途径的描述，既包括对各种事件态势基本特征的定性和定量描述，同时也包括对各种态势发生可能性的描述<sup>[27]</sup>。情景分析的最基本观点就是承认事件未来的结果和实现这种未来结果的途径都是不确定的，但可以将可能出现的未来以及实现这种未来的途径的构成描述为情景。情景分析过程的实质是完成对事物所有可能未来发展态势的描述，其结果包括三大部分内容：①对可能在未来出现的发展态势的确认。②对各种可能态势的主要特性及其发生可能性的描述。③各种可能态势的发展路径分析。将情景分析的思想具体应用到非常规突发事件应对领域，多数研究都是将“情景”作为事件具体情形的一种表示，形成对突发事件发生时或发生后有关情形的一种简单假设<sup>[69, 99]</sup>。尽管已经有学者在部分研究中明确地将突发事件的情景定义为决策主体所正在面对的事件发生、发展的态势，研究了情景演变的分析流程<sup>[100]</sup>，但对情景的定义及相关应用也仅限定在了定性分析层面。整体来看，将情景理论和情景分析方法应用在“情景-应对”中的研究

才刚刚起步,对非常规突发事件“情景”的认知还较为模糊,在概念定义上也还没有形成共识,对“情景”的描述与应用还缺乏规范,这给“情景-应对”体系的深入研究带来了较大阻碍,因此有必要首先对相关概念进行明晰的界定。

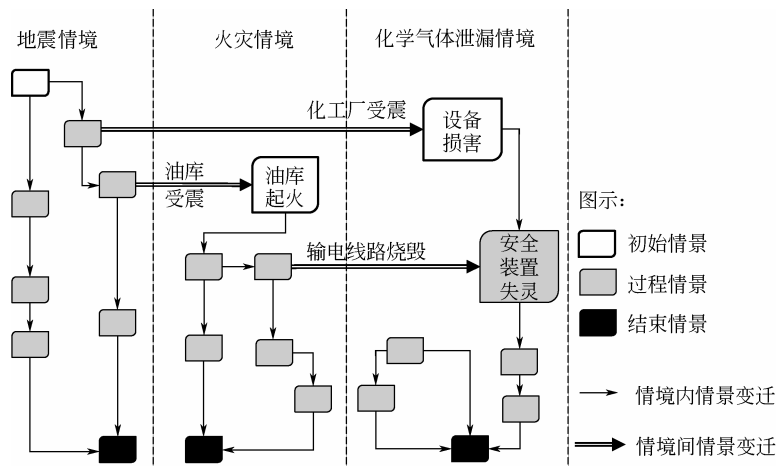
本书认为,非常规突发事件发生、发展和转变的影响因素众多,发生原因复杂,存在转化、蔓延、耦合等多种演化途径和方式,试图仅仅用“情景”一个概念去涵盖上述复杂内容和关系构成的事件情形是困难的,也不利于事件描述的形式化和定量分析。因此,本书分别从静态视角和动态视角定义“情景”和“情境”两个概念。这两个概念作为主要元素,共同构成非常规突发事件情境重构的基本单元。

从静态视角研究非常规突发事件,“情景”可以认为是一种对不确定环境中非常规突发事件在某一具体时间片段上的属性状态描述,对应着非常规突发事件在不同时空节点上的集成表现。

从动态视角研究,情境(Context)是情景发生、发展的上下文空间,涵盖了事件情景相关的自然、社会、组织等结构因素和人的知识、经验、心理等感知驱动因素,连接起一系列情景。情境和情景的关系如图2-1所示。“情境”中既蕴含了对非常规突发事件发展经历的情景状态的描述,也蕴含了引起一种情景向另一种情景转变的自然发展和主观应对措施(本书统称为情境作用因子),更强调了这一过程中所体现出的事件情景之间所蕴含的动态性和关联性。同一情境中所包含的前后情景在自然发展和应对措施作用下形成因果关系,分别称为前因情景和结果情景。通常情况下由于非常规突发事件自身的复杂性,前因情景和结果情景都不是单一情景,而是分别由一组相关情景构成的情景集合,称为“前因情景集”和“结果情景集”。情境中包含着一系列“前因情景集”和“结果情景集”构成的有序



对，称为情景序偶。不同情景序偶中的情景状态可能互为因果，即一个序偶中的结果情景有可能成为另一个序偶中的前因情景；同一个情景也可能自为因果，即存在在一定时空条件下始终保持某种情景状态的情景序偶。因此，在一个情境内部，情景之间按照情景的相互转化关系将形成一定的情景序列；在情境之间，随着情境要素的不断变化而不断变化情境，推动事件的纵深发展，逐渐形成更深层次的事件情境关联。



◎ 图 2-1 情境和情景的关系

根据情景在情境中发生的先后关系，将事件进入某情境下的首个情景称为初始情景，将事件在该情境下经历的最后一个情景称为结束情景，将初始情景和结束情景之间的情景统称为中间情景。如前文所述，情景之间的关联关系表现为前后两个情景集形成的序偶，根据情景序偶所包含的前因情景和结果情景的不同对应关系类型，可以将情景序偶分为简单情景序偶与复杂情景序偶。简单情景序偶是指序偶中关联的是一个前因情景在情境作用因子的影响下变迁为一个结果情景，是突发事件情景序偶中关系最简单的一种。但

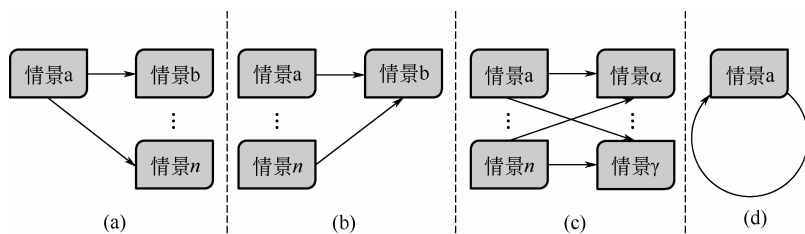
更多情况下,前因情景和结果情景分别是由一组情景组成的情景集,因此在这类情景序偶中,前因情景与结果情景并不是一对一的关系,这样的情景序偶称为复杂情景序偶。复杂情景序偶中的对应关系分为三种类型:

(1) 前因情景与结果情景是一对多的关系,即一个前因情景在作用因子作用下变迁为多个结果情景[见图2-2(a)]。例如,火灾中,大火情景可能同时导致危险设备爆炸和房屋倒塌等多个情景。

(2) 前因情景与结果情景是多对一的关系,即多个前因情景在情境作用因子作用下共同变迁为一个结果情景[见图2-2(b)]。例如,将恶劣的气候环境和输电线路老化作为两个前因情景,它们在情境作用因子作用下可以共同导致输电中断情景。

(3) 前因情景与结果情景是多对多的关系,即多个前因情景在情境作用因子作用下共同变迁为多个结果情景[见图2-2(c)]。例如,大风、暴雨以及山体、植被破坏等多种情景在作用因子作用下可能同时导致洪涝、泥石流等多种灾害情景。

情境中同时存在上述几种情景序偶关系类型,从逻辑关系上分析,情境主要体现了事件某一逻辑层次上情景之间的因果关联关系;从包含内容上分析,非常规突发事件的情境包含一系列分别由前因情景、结果情景、作用因子和转换概率构成的情景序偶。



◎ 图2-2 复杂情景序偶的分解示意图

### 2.1.2 非常规突发事件情境重构

情境重构（Context Reconstruction）的思想起源于安全领域（包括物理事件的安全和信息事件的安全）中用来分析事件发生根源和发展过程的事件重构方法。事件重构所调查的是影响或破坏系统安全的事件为什么会发生以及事件发生的过程。而在非常规突发事件领域，情境重构用来指代根据部分已知的事件实时信息和历史信息去描述或模拟构造事件情境要素信息，由此运用时间信息、情境信息和决策信息对非常规突发事件进行描述，并重新构造非常规突发事件系统中一系列事件情境发生的顺序和逻辑关系。即利用情境的特征，预测推演或描述重现突发事件发生的过程。即非常规突发事件的情境重构的目标是能够回答：当前发生了什么事件，该事件是如何发生的？决策用户在此基础上可以部分推测将来有可能发生什么，发生的可能性有多大，从而支持决策者对决策任务的认知和完成实时应对决策。

由情境的概念和特性可知，在不同分析层次上，都可以将非常规突发事件看成由一系列包含众多要素的情境按发展顺序而构成，每个情境中又包含着由一系列情景关联形成的情景序列。在情境要素内部以及不同情境之间存在一系列在自然发展和决策措施影响下发生的情景演化和变迁。非常规突发事件的情境重构正是要分析出情境层次的构造，以及情景序列的构成和内在逻辑关系。依靠情境网络和重构表达，在应对准备和实时应对阶段，可以辅助决策人员对事件的演化方向和路径、各种关键情景的演化概率和时间进行动态预测、分析与预警；对衍生与次生事件、综合应急响应行动等决策行为与事件自身发展的交互演化进行定性与定量分析；在事件应对后的学习阶段，决策者可以利用情境重构对事件应对过程进行复盘

分析,有助于验证情境表达要素和描述方法的可用性,进一步分析非常规突发事件进程的影响因素和演化规律并总结应对中的得失。

## 2.2 非常规突发事件的特征及典型情境

---

非常规突发事件(Unconventional Emergency)是指事件前兆不充分、难以预测、复杂性特征明显、存在潜在次生衍生危害、一旦发生后导致严重破坏的突发事件。相对于其他事件,非常规突发事件在发生、发展及事后影响等方面都具有独特的表现特征。主要表现在以下几个方面。

### (1) 突发性

非常规突发事件常常是毫无征兆的突然发生,或者是在刚出现征兆后就在极短时间内大规模爆发。这种突发性迫使决策人员在紧迫的情况下对事件快速做出决策,对决策质量是个极大的考验。因此,迫切需要在决策方式和决策方法上的有效转变。

### (2) 复杂性

非常规突发事件的复杂性表现在多个方面。首先是信息缺失与信息爆炸的交织过程。在事件初期,由于事发突然,且事件破坏性巨大,决策者往往难以获得事件的相关信息,即信息缺失的情况非常明显。在这一情况下进行决策,更多的是靠决策者采取直觉决策或经验决策,决策的质量往往难以有效保证。但随着事件的发展,事件的涉及面逐渐增多,涌现出的异构信息也越来越多,甚至在短时间内出现信息爆炸的情况。对上述海量、异构信息的有效处理,成为这一阶段决策质量保证的关键问题。

其次，非常规突发事件的复杂性表现在事件的发展、变化的机理非常复杂。事件的影响因素众多，影响的机制多样化，且很多机制还没有被认识。

### （3）巨大破坏性

非常规突发事件普遍具有巨大的破坏性，一旦发生，往往造成巨大的经济损失或人员伤亡，给社会生活带来极其严重的影响。并且事件的衍生、次生破坏往往难以预料和控制，导致事件的破坏性进一步加剧。

非常规突发事件的特征形成了事件情境的特殊需求，在情境描述和重构中应该重点考虑以下几方面的情境特性。

#### （1）离散特性

非常规突发事件具有明显的离散特性，表现为事件情境的初始情景通常是在几乎不具备一般事物发生前的征兆或者是征兆不明显的情形下突然发生，并且事件的中间情景之间的转换也是离散的。离散特性意味着事件的突然发生，同时也意味着事件情境的突然转换，即不能通过连续的状态方程对其进行描述，并且传统的离散描述方法也不能刻画情境的系统动因和情境要素之间的关联关系。这一特性为突发事件情境重构提出了难题，以往研究中的状态空间、状态描述等方法不能够直接用来刻画事件情景，需要用重构方法实现对系统情景状态的序列性刻画。

#### （2）虚拟和实时情境均可涵盖

非常规突发事件情境涵盖了真实可观测的实时情境、模拟情境和基于案例的历史情境三种情况的情境。需要针对不同情境处理不同的信息来源，构造情境要素，为非常规突发事件应急的多个主要阶段和过程提供情境基础。在应急准备阶段，“情境”是应急的基本准备要素，决策者可以结合历史案例，在实时情境信息的基础上，结合历史情境进行对比分析，将分散

的情境重构为清晰的情境描述，从而构造出不同的应急愿景进行分析和准备，为“情景-应对”的应急准备提供规划参考。在实时应对阶段，决策者可以通过历史情境对以往事件发生及运行规律进行识别和收敛，充分认识当前事件在未来可能发生的情景，并通过实时情境和虚拟情境相结合的情境重构过程，利用决策方法充分预测、评估相关决策措施所达到的效果和带来的影响，形成和制定相应的应对措施。

### （3）网络化结构特性

现代社会系统的集成性和先进性也造成了系统结构的复杂化，尤其是对突发事件来讲，面向的常常是需要一个地区、国家甚至全世界共同参与的复杂事件系统，系统内部又嵌套着不同级别的子系统。因此，突发事件的情境总是呈现出一种多层次、交错的网络结构。当面向不同决策层次的决策者时，需要在情境网络中划分出不同的情境层次以形成各自有针对性的情境参考。例如，对于事件的高层决策者，更需要关注事件整体可能造成的风险性和破坏性，因此，主要关注在事件链情境层次上的要素变化所带来的情境切换；而对于现场决策人员，需要更多关注包含具体环境、应对资源等要素在内的决策细节，因此，需要更关注事件状态，即由事件状态层次的情境元素变化所带来的情境切换；而对于事件的分析人员，常常需要关注导致事件状态变化的因素，即在因素情境层次上展开更多的决策和分析工作。因此，对于来自不同部门的不同领域的某些决策者，可能需要单独为其定制情境层次，并呈现包含不同层次的情境网络。

### （4）情境的序贯关联特性

突发事件面向的社会系统是动态的，情境的演化会随着事态的自然发展和用户的决策行为而向前交错发展，事件系统每一阶段可能出现的状态

是随机或不确定的。因此，事件情境也是动态时间序列相关的，其生命周期各阶段情境互相影响，一个情境的变化，将导致后续情境的逐级变化，使整体事件的情境发展呈现出完全不同的路径。例如，民间常说的“大灾之后必有大疫”“旱极而蝗”等说法就很好地描述了灾害情境之间的序贯关联特性。

## 2.3 非常规突发事件情境重构体系框架

---

非常规突发事件情境重构的目标是提供对非常规事件情景状态和情境过程的描述表达，是为决策人员了解事件、分析事件、有效进行决策应对而服务的。非常规突发事件发生时的情况极其复杂、超出经验，在应对过程中直觉决策、行为决策、有限理性决策等方法都可能被采用，因此要求情境描述和情境重构方法能够以通用的形式被多种决策方法便捷地集成使用。基于非常规突发事件的情境特征和演化机理，非常规突发事件情境重构体系包含了四个方面的模型和方法。情境重构集成体系框架如图 2-3 所示。

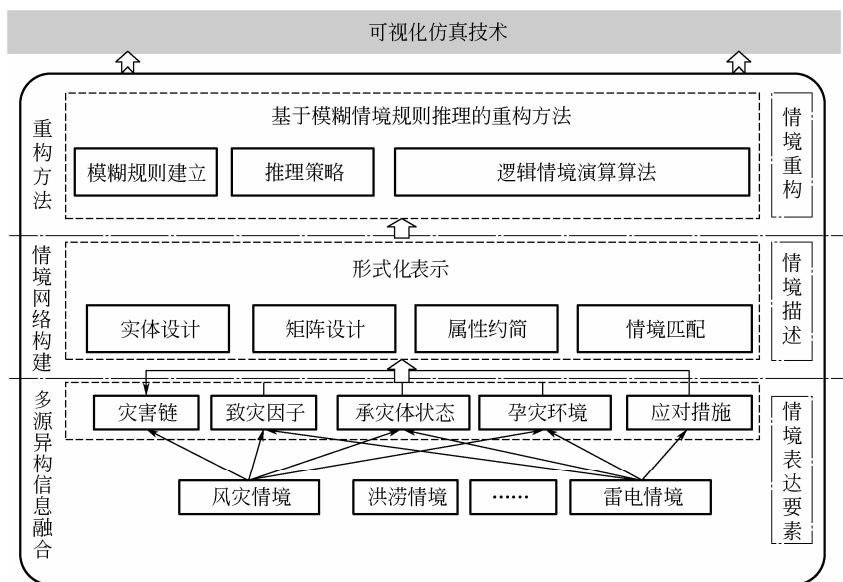
### （1）多源异构信息融合的模型方法，支持情景构造和情境描述

在“情景-应对”体系中，非常规突发事件情境是决策的重要依据，而信息又是情境描述与情境重构的基础。因此，从情境重构的过程来看，获知非常规突发事件发生的信息就成为情境描述的第一步。多源异构信息融合模型的主要任务就是信息获取和信息规范化处理，主要有以下三种途径：

- 从数据库、历史信息库、情境案例库等存储中直接获取信息；
- 从包括物联网在内的各类监测系统中实时监测、捕获的各类准备信

息中提取;

- 决策者根据事件之间的逻辑关系和规则进行推理获取的信息。



© 图 2-3 情境重构集成体系框架

非常规突发事件应对中，通过各种途径所获取的信息通常都是零散、异构的，很难直接对应于情境描述，需要从信息集成和知识转化的角度研究多源信息融合的模式方法，并对异构信息进行规范化处理。

## (2) 多层次情境网络描述模型方法

非常规突发事件的情境描述包含两个部分：事件系统在某一时空节点上的静态描述（主要包括事件情景所反映的系统结构和趋势），以及沿时空推移的事件系统演化过程中的动态情境描述。非常规突发事件的情境网络描述模型方法是在事件信息融合的基础上，通过描述情境的要素实体在事件过程中的情景和响应措施，以及可能导致发生的后续情景，体现情景之



间的关联作用，并将这些情境中的情景串联成情景序列来描述事件发展和应对过程。决策人员理解、分析判断突发事件，需要尽可能快捷、准确地描述两个问题：一是突发事件的当前情景和已经发生的情景，二是将来某类情景发生的可能性和发展路径。这需要以情境要素表达和情境网络描述方法作为基础。通过对非常规事件阶段性情境演化机理的研究可知，事件情境包含的常常是一些情景引发另外一些情景的一个序贯过程，时间上具有先后性，逻辑上具有因果性，但更侧重逻辑性；在描述上可以借鉴灾害链的研究方法，抽取典型案例的影响因素，整理情境要素，通过形式化方法构建情境特征。在动态分析方面，需要描述情景序列的关联关系，通过情境组合描述事件发展过程和逻辑规律。

### （3）情境重构方法

非常规突发事件情境重构的最终目标是能够依据事件因素的内在关系规律，最大化地重构事件的情景序列及多层次情境过程。而在理想的情况下，通过情境重构方法得到的非常规突发事件情景序列应该具有以下性质。

- 完备性：事件情境应该包括事件演化过程中的主要情景，即不能遗漏对事件决策有一定影响的关键情景，也不能遗漏对情景之间的转换起到关键作用的决策措施和自然演化动力。

- 精炼性：考虑到决策者在决策时所面临的各种极端环境和压力，情景序列应最大化去除与事件演化不相关的分支和节点。

- 动态性：情景之间的关联需要根据情境库中的规则和专家知识进行判断，存在一个相对主观的过程。情景序列的动态性表现为在时间成本可接受的前提下，情境重构过程中可以通过不断修正某些关联规则和知识而重新形成整个情景序列。

本文提出的情境重构方法主要是在关联分析方法的基础上，通过综合

情境关联规则和情境逻辑演算算法，建立情境重构模型。在信息不完备和强时间约束下，可以通过基于模糊规则的情境推理和基于逻辑的情境演算算法进行情境演化分析。基于模糊规则的情境推理可以最大限度地利用专家知识，快速地推演非常规突发事件情境重构。但这种方法对观测的样本和精度要求较高，并且专家知识规则库的构建也不是一朝一夕可以完成的，是一个持续不断的累积过程。因此，采用基于逻辑情境计算算法可以对上述缺陷进行一定程度的改善，该算法更强调对实时情境的逻辑推导，可以在观测手段不充分、缺乏事件的专家知识情况下进行应用。

#### （4）可视化仿真模型技术

情境重构的可视化模型技术不仅可以实现快速的情境信息共享，还可以通过图形化的情境演化辅助决策人员进行应急决策，是情境重构描述的有效辅助工具。非常规突发事件的多层次情境表现和动态演化都相当复杂，如何高效地浏览、操作、导航大量的情境网络结构数据是可视化能否成功的关键。在情境重构体系中需要建立适应的可视化方法，设计实现情境网络视图的扩展、收缩、多视图叠加等显示技术和模型算法。

## 2.4 非常规突发事件的情境要素

---

情境要素主要是指围绕非常规突发事件的客观发展与主观应对措施起到支持作用的，成为突发事件情境描述重要组成部分的那些因素。非常规突发事件本质上是一类极端不确定事件，其情境的构成应充分考虑对不确定性因素的描述。通过对不确定性进行分解可以发现，非常规突发事件的

不确定性由三部分构成：

（1）事件内部客体自身的不确定因素，包括非常规突发事件发生的自然环境、受灾对象和事件对象自身的各种不确定性状态。

（2）事件外部的不确定因素，包括促使非常规事件情境纵深发展和横向转化的各种影响因素。“影响因素”主要是指可直接导致事件初始情景的发生或对事件某一情境产生深刻影响的多种因素及其组合，包括各种可能影响事件发生的自然因素和人为因素。对具有罕见性的非常规突发事件而言，很难对本质上的不确定因素进行预测，但可以通过对事件的不断观测、对历史事件案例的不断总结而对之形成一定的认识。

（3）由于事件信息缺乏或信息海量，以及对上述因素影响作用规律性的了解所造成的不确定性，可以利用发生概率和知识规则等方法尽可能地降低不确定性，不断增进对可预测的、规律性的要素的识别和验证，从而大幅度降低不确定性，以便重构事件过程或预测某些未来情景。在相关研究中，史培军在现代灾害理论中提出了由“致灾因子、承灾体及孕灾环境共同组成的灾害系统”的概念<sup>[52]</sup>，指出灾害系统的要素包含了上述几个方面的详细因子，描述了推动灾害发生、发展的系统性因素。灾害链是非常规突发事件的典型表现形式，因此本书借鉴灾害链理论对非常规突发事件中的情境要素进行分析。灾害学用因子分析理论研究灾害情境的构成和驱动，但其侧重于对自然灾害形成的因素进行分析，而突发事件的“情景-应对”需要更多关注决策行为在事件发生、发展过程中的交互性作用，即突发事件的各个阶段都可能由于应对措施的介绍而对事件情景发展产生影响。因此，除了事件发展的客观因素之外，应对决策活动也是驱动事件情境发展的关键性因素之一，应当包含到情境

的驱动要素当中。因此，在分析突发事件的情境要素时，将决策主体的决策活动包含到要素构成当中。本书主要研究决定情境本质特征的结构要素和决定情境转换的驱动要素。

### 2.4.1 情境结构要素

#### 1. 致灾因子要素

致灾因子描述了对事件发生和发展起推动作用的直接致灾因素的集合，按照致灾因子产生的来源，可以分为自然致灾因子和人为致灾因子两类。自然致灾因子包括自然灾害中较为常见的如地震、台风、寒流、火山喷发、暴风雪、山体泥石流滑坡、沙尘暴、山洪海啸等；人为致灾因子包括国际战争、区域冲突动乱、人为火灾、安全事故等。本书研究的是自然灾害类的非常规突发事件，因此主要以自然致灾因子为主，以人为致灾因子为辅，将两者结合起来构成的致灾因子作为非常规突发事件情境的结构要素之一。该类要素包含以下属性。

（1）因子名称或类型：用自然语言描述的致灾因子的名称或类型，用于区分不同类型或特点的致灾因子。在我国，相对常见的自然灾害类非常规突发事件包括地震、洪涝、风暴、冰雪及干旱。以电网灾害为例，根据灾害的形成原因具体划分，在复杂电网中易导致非常规突发事件发生的七类主要致灾因子包括风灾、洪涝灾害、雷电袭击、火灾、持续大雾、地震及覆冰。

（2）状态：每类致灾因子都包含一组状态名称和状态值。本书总结了复杂电网灾害案例中的洪涝、风灾、雷电等几种典型致灾因子和对应的状态描述，如表 2-1 所示。

表 2-1 复杂电网中主要自然致灾因子

典型案例	致灾因子	因子状态指标
2003 年 8 月上海浦东新区强雷灾害造成电网中断	雷电	雷电流幅值、回击次数
2004 年 2 月至 3 月浙江金华森林火灾对电网造成严重破坏	火灾	火势、蔓延方向、烟火高度
2004 年 2 月华东地区持续大雾，造成多条电网线路污闪跳闸	持续大雾（污闪）	污秽、湿度
2006 年 8 月台风“桑美”造成福建、浙江局部电网崩溃	风灾	台风强度、风速、风向、引导气流、副高脊线位置、气压梯度力、地转偏向力、台风内力
2007 年重庆暴雨洪水造成电网中断	暴雨、洪涝	降水量、最大流量、最大区域流量
2008 年汶川地震造成电力网络严重损毁	地震	震级、烈度
2008 年南方冰冻灾害，骨干电网严重破坏	覆冰、大风	最大冰雪深度、平均雪压、风力、风向、路径

2. 承灾体要素

各种致灾因子施加作用的对象都可以称为承灾体，承灾体要素既包括各种实体物质类资源，也包括承受灾害的各类人员。可以将承灾体理解为人类自身、物质世界及人类生活、活动所共同组成的社会系统。对于非常规突发事件来讲，由于其规模巨大，作为承灾体的社会系统一般包含了面积较大的受灾区域内的物质实体资源和大批人员。承灾体发生变化是次生、衍生灾害事件的发生和发展的主要标志，是事件情境变化的一个明显的结构要素，在复杂电网灾害案例中常见的承灾体及其属性设计如表 2-2 所示。

表 2-2 承灾体及其属性设计

类 别	属 性
人 员	人员分布、受灾人口、伤亡人数
房屋、建筑物	强度、抗毁等级、受损状况
社会区域	经济状况、政治状况、应急演练能力、损失状况

续表

类 别	属 性
输电线路	线材、额定负荷、线路长度、经过区域
变压器	潮流限制、额定输入输出、稳定性
设备	数量、功率、精度、损毁度

承灾体的主要属性如下。

（1）名称或种类：用自然语言描述的承灾体的名称或类别，用于区分不同的承灾体。实体物质类承灾体主要包括建筑物、道路设施等，非物质类承灾体则是指受到灾害影响的各类人员。

（2）状态：承灾体的状态包括自然条件，人口和社会经济背景数据，灾害造成的损失（包括人员受灾情况、人员伤亡数量、农作物受灾情况、房屋倒塌、损坏情况及造成的直接经济损失），对应急措施的关键性需求等。

3. 孕灾环境要素

通俗地讲，孕灾环境是指灾害孕育发生、发展和演化的环境，它描述了致灾因子与承灾体所处的外部环境，包括自然环境、人文环境、社会经济环境、大型设备等物理设施环境。通常来讲，孕灾环境和承灾体所代表的社会系统会有一些相重合的因子，如某些电网设备被灾害破坏时可以作为受灾的承灾体，也同时可以理解为孕灾环境的一部分容纳着致灾因子和其他承灾体。但孕灾环境更偏向于生态环境，因此可以将孕灾环境理解为突发事件所面对的一个生态系统。当相同的致灾因子与承灾体处于不同的环境时，造成的后果可能完全不同。例如，在我国南方，同样规模的气流在某些山地孕灾环境中会形成飆线风灾害，而在其他环境中则不会形成灾害破坏。因此，孕灾环境要素的变化也是事件进入一个新情境的重要标志。

孕灾环境的主要属性如下。

(1) 名称或种类：用自然语言描述的孕灾环境名称，用于区分不同的孕灾环境。

(2) 状态：根据上述分类原则对孕灾环境不同类别下的类型、强度、能力等属性的描述。本书对孕灾环境属性状态设置包括两个部分：一是与地理因素相关的属性，例如，相关设备、物品的物理位置摆放以及事件区域所处的地理位置，如易燃品的存储地点；是否邻近洪水区域、地震断裂带和大坝；是否邻近危险化学品的生产、存储、使用和运输企业；是否邻近重大交通干线和机场；是否邻近核电厂等都是对事件情境演化具有关键影响的因素。二是考虑社会综合因素，例如，相关区域是否发生过类似的非常规突发事件，是否有经常性的应急演练，应急资源与能力是否配备齐全等。

#### 4. 事件链要素

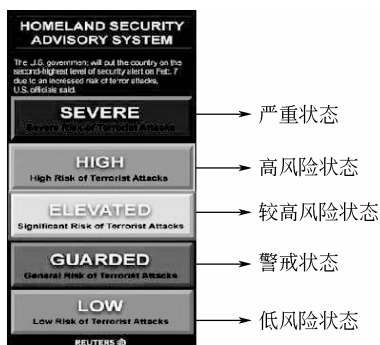
非常规突发事件对外输出为事件对外部的破坏影响或相应的损失，主要表现为事件本身及衍生、次生事件造成的综合性灾害事件链。事件链是非常规突发事件的典型特征之一，这一输出型要素表征了原发事件、衍生事件、次生事件中的节点性质，因此，事件情境主要输出为事件（灾害）链上各种事件节点造成的灾害级别、强度和损失等，即以事件（灾害）链为输出结构要素。

该要素包含以下属性。

(1) 名称：用自然语言描述的事件名称，用于区分不同的事件链节点。根据事件情境的级别关系，可以是粗粒度、高层次的事件，如洪涝事件、雪灾事件等，也可以是细颗粒、低层次事件，如某个设备的爆炸事件等。

(2) 状态：事件链的状态用事件的级别来表示，它描述了事件可能造

成的损害级别。本书采用美国联邦应急计划关于美国紧急事件中灾难分级进行级别表示,即美国核管理委员会(NRC)在国土安全咨询系统(HASA)的基础之上提出的“威胁预警系统”中,将事件分为五个等级,分别以五种颜色编码,如图2-4所示。这五个等级是:绿色(低风险状态——正常/常规级别);蓝色(警戒状态——提高关注);黄色(较高风险状态——常规威胁);橙色(高风险状态——迫近威胁)和红色(严重状态——定域威胁)。



◎ 图2-4 事件级别

资料来源: 美国核管理委员会。

致灾因子、承灾体、孕灾环境和事件链表现共同构成了非常规突发事件情境的结构要素,其中致灾因子通常表现为主要诱因,在某些承灾体和孕灾环境的特定条件下共同产生区域性的能量急剧释放,导致非常规突发事件爆发,以事件链的形式表现为对外界的破坏效应。

### 2.4.2 情境驱动要素

本书用情境作用因子(以下简称作用因子)来表示情境的驱动要素,描述对情景转换起主导作用的影响元素。它是指事件系统在前因情景下的



状态转移或引发的应急响应措施，它表征了前因情景集和结果情景集的关联。作用因子始终与前因情景集和结果情景集联系在一起，它既包含了事件客观发展的影响元素，也包括了决策者主观应对措施。作用因子的存在表明了非常规突发事件的情景之间不是孤立的，而是存在一定的因果关联关系，这种关联关系推进了事件系统状态的发展变化。作用因子通过各种活动加速或减缓情景之间的转换并且本身常常带有一定的约束条件（例如，作用时间、活动成本等）。结构要素之间的相互作用和决策应对措施共同组成了情境驱动要素，决定了情境的深化和转换。驱动要素的作用首先表现为通过改变结构要素的属性状态而促使情景发生变迁，形成情境深化；当驱动要素的作用对情境结构要素构成产生影响（如引起致灾因子或承灾体的新增或消失）时，则可以识别为促使事件进入了新情境，即形成情境转换。情景变迁概率是驱动要素的量化表现形式，可以通过对结构要素属性状态变化的综合评判得到变迁概率的确定量化值或模糊值。根据贝叶斯网络理论，情境中的情景变迁概率可以采用先验概率，并根据对突发事件信息的不断积累而用后验概率进行修正。需要说明的是，当变迁概率为 0 时，表明事件在当前情境下将维持在前因情景上，在一定的时间段内不再向后继续演化，即当前情境的前因情景将成为情景序列的终结情景节点。

## 2.5 非常规突发事件的情境演化机理

---

大量研究结果表明，各种自然灾害系统是不可逆的复杂动态演化开放系统，呈现出以外部环境为源头因素而导致自然灾害系统内部发生和对外活动的一系列链发式复杂响应行为过程。非常规突发事件涉及的是一个复

杂群体，事件环境具有不确定性、复杂性和模糊性，事件自身及次生衍生事件链的关联复杂。基于此，对非常规突发事件的情境演化机理的理解应建立在以下三个主要原则之上。

(1) 复杂系统性思考 (Complex System Thinking)。传统的研究思路侧重于对单一个体的分析，尽量将系统的状态与个体的变化进行对应，却忽略了对系统整体的认识，因此常常导致在揭示系统演化的内在动因与作用机理方面的失败。所以在研究思路必须加强对复杂系统的整体性分析。尤其是对突发事件来讲，面向的常常是需要一个地区、国家甚至全世界共同参与的复杂系统，系统内部嵌套着不同级别的子系统。因此，突发事件面向的系统总是呈现出递阶多层结构，相对应的应急决策也表现出复杂的多层次和多目标特性。根据混沌理论，复杂系统通常具有分岔、混沌和有序以及它们之间的错综复杂的相互转变<sup>[101]</sup>。事实上，复杂性系统存在不同的等级及层次结构。宏观层次和微观层次的复杂性也不一样。即使在宏观层次，人类社会中还包含自然、社会和精神三种不同层次的属性，而每个层次都有各自的复杂性。三种层次耦合加剧了问题的错综复杂性。

(2) 开放式未来思考 (Future-open Thinking)。突发事件导致衍生、次生事件发生，多事件之间耦合，危害涉及面广、影响力大，可能是一个地区甚至整个国家及全世界。突发事件往往引发“多米诺骨牌”效应，超出了一般社会事件的发展规律并呈现出易变性特征，有时甚至呈“跳跃式”发展，因此在分析情境演化时必须将事件多种可能的途径和结局考虑进来。

(3) 序贯性思考 (Sequential Thinking)。突发事件面向的社会系统是动态的，系统每一阶段可能出现的状态是随机或不确定的。因此，应急决策所面临的决策问题是动态时间序列相关的，其生命周期各阶段决策及系统不同层次的决策周期性互相影响，本质上是属于多次匹配的序贯决策。

在情境演化分析上必须体现序列特性，满足多阶段、长远的决策需求。

## 2.5.1 非常规突发事件演化分析的理论视角

### 1. 突变理论

从对自然和社会现象的观察过程中，人们发现除了状态连续的系统变化外，还存在众多跳跃形式的状态突变。在非常规突发事件面对的复杂社会系统中，这种由系统的涌现形成的突变现象显得更为明显和突出。20 世纪 70 年代，法国数学家 Leineituomu 在数学的理论阐述中介绍了突变理论。该理论认为在由包含一组参数的函数表示的系统状态中，当函数具有唯一取值时，标志着对应系统具有稳定状态；当参数在定义域区间内波动变化时，该函数具有不唯一的极值，标志着对应系统处于不稳定的状态。在突变理论视角中，非常规突发事件是系统状态突然变化的系统不稳定表现。

长期以来，哲学界一直对系统关键性质变是通过状态连续变化还是通过跳跃式突变实现的问题存在争议。如果将系统认为是可控制的，则可以认为：若通过严格控制可以实现系统在关键性状态变化的过程中经历了缓慢而平滑的系统状态渐变，系统就是一个状态连续变化过程；而如果无法确切观察到关键性状态变化过程中的平滑渐变，则系统的变化就是由突变来实现的。非常规突发事件中的突变性表现较渐变性表现更为明显，如将地震灾害和其常常引发的海啸、泥石流灾害看成系统状态的关键性状态，则这些状态之间不存在或无法观察到渐变的系统状态，是明显的突变形式。

突变论自身还存在需要进一步验证和发展的理论环节，尤其是在将突变论应用于非常规突发事件领域时，在系统参数设计、数据观察和模型构建方面都还有大量的实践困难要解决。因此，突变论虽然对非常规突发事件的发展和演化提供了一种解释思路，但还无法直接应用该理论对非常规

突发事件的演化进行描述和分析。

## 2. 生命周期理论

对非常规突发事件的生命周期分析主要分为两种理论角度：一种是从非常规突发事件自身的发展过程进行周期划分，另一种是站在事件应对的角度对非常规突发事件的管理过程进行周期划分。主要的理论模型如下。

(1) 当前被广泛采用的一类生命周期模型是“四阶段理论”：即将非常规突发事件划分为“减灾、应对准备、应急响应和事件恢复”四个阶段。这四个阶段涵盖了对非常规突发事件的应急管理过程，有助于对决策者的应对活动进行分类研究。但其缺陷是各个阶段之间的重复性活动造成了在实践中较难清晰地划分四个阶段之间的界限。

(2) 巴顿(Barton)将灾难性的突发事件划分为五个阶段：灾害前阶段、灾害监测与预警阶段、无组织的自发性应急响应阶段、有组织的社会全员性应急响应阶段、灾害之后的恢复阶段。

(3) 米特罗夫(Mitroff)1994年提出的五阶段模型，模型中的五个阶段包括：用于预警和预防的信号侦测阶段，探测预防阶段，危机发生后用于避免危机扩散的控制损害阶段，事件被初步控制后用于帮助组织机构正常运转的恢复阶段，以及在事件结束后用于反馈、整理和总结的学习阶段。

(4) 薛澜等<sup>[102]</sup>在2003年提出的五阶段模型：与米特罗夫的五阶段相对应，该模型包括了危机预警阶段、危机识别阶段、危机隔离阶段、危机管理阶段和危机后处理阶段。

### 2.5.2 基于情境的演化机理分析

基于突变理论和生命周期理论的模型为分析非常规突发事件不同阶段的情境表现和特征提供了一定的理论基础。从进化的广义性质上讲，事件

演化包括了四个阶段的过程。

(1) 事件的产生(或开始): 万物的本源都是由零开始, 由于某些影响因素的存在, 当这些因素在某些条件下发生混合作用, 历经一段过程, 逐渐形成了事件系统的内在结构与外在表现。

(2) 事件的维持阶段: 事件发生后即完成了系统的产生阶段, 事件系统内在的体系结构、元素关系及与外部环境的复杂交互能力形成了系统维持自身稳定并逐渐发展的能力, 这一能力贯穿在事件系统的维持发展阶段。

(3) 事件的演化: 当某些外在因素的变化对系统产生了冲击, 造成了事件系统内部结构、元素等行为的变化, 在这些变化的共同作用下, 事件系统可能产生出与原有状态、行为有明显区别的特征, 这一阶段就是系统的演化阶段。

(4) 事件的消亡: 事件在发生、发展、演化的过程中, 伴随着能量的聚集、释放过程, 当能量的产生作用强于能量的释放时, 事件系统表现为不断向前发展, 而当能量的释放成为主要表现时, 事件系统就逐渐进入了一个衰退的过程, 直到推动系统发展的能量消耗殆尽, 事件就最终进入了结束阶段。

结合突变论与生命周期理论, 作者认为: 非常规突发事件, 尤其是自然灾害类的非常规突发事件, 是一种在自然气象、人文环境、社会等因素综合作用下的不可逆的复杂动态演化开放系统, 呈现出以致灾因子为源头导致承灾体和孕灾环境的属性状态发生变化, 形成情境的初始化和积累, 在逐渐经过情景变化后对外产生破坏作用, 同时在应对决策措施的作用下不断转变破坏作用的形式和方式的一系列链发式复杂响应行为过程。即突发事件的源头通常表现为某些情境要素的状态变化, 然后经历要素之间的相互作用, 产生了较单一因素更为剧烈、明显的破坏效应。因此, 以致灾

因子为事件诱发源头，情境要素的相互作用通常表现为以下几种形式：

（1）致灾因子直接作用于孕灾环境中的承灾体上，产生破坏效应。例如，地震灾害就是地震致灾因子直接对环境中的承灾体造成破坏。

（2）致灾因子之间首先形成相互影响，形成致灾因子之间的链式效应，然后作用于孕灾环境和载体上产生破坏效应。例如，2008年的南方冰雪灾害，首先是低温、雨雪等致灾因子之间形成链式效应，表现为多种致灾因子组合作用在电网、铁路等承灾体上，最终形成基础设施的级联失效情境。

（3）致灾因子作用在孕灾环境与载体上，在相互作用后形成了新的致灾因子或承灾体，形成灾害破坏的链式效应。例如，在地震初期的破坏之后，致灾因子、孕灾环境、承灾体之间的相互作用可能产生了火灾、爆炸等新的致灾因子，并作用在新的承灾体上产生衍生、次生灾害。

（4）在事件发展过程中，包含了决策措施的情境驱动要素对事件致灾因子、孕灾环境和承灾体等要素产生的双向影响。通常来讲，当驱动要素具有正向作用时，可以减缓或消灭致灾因子的作用，降低对孕灾环境和承灾体的破坏作用。但当应急决策措施的效果不佳，甚至由于决策上的失误产生负面作用时，则可能产生新的致灾因子或承灾体，进一步加剧突发事件的破坏效应。例如，在美国的巴尔的摩大火事件中，由于错误估计了火势形式，不正确的消防措施引发了爆炸等新致灾因子的产生，将突发事件引向了衍生、次生灾害情境。

从情境表现的共性上看，非常规突发事件的演化过程主要表征为突发事件系统在外部的（外部自然作用和外部应对措施）作用影响下情境的内在组成部分的运动变化规律，表现为：

（1）情境结构要素内部状态的变化，即系统情景的转变，情景之间的

逻辑变化关系不断形成情境关联，即由起始情境不断延续发展，直到到达终止情景，从而形成情景序列。在情境作用因子活动的作用下，情景之间的转换概率受到影响，情景之间可能产生选择性关联转变，通过变换情景序偶组合序列的不同分支而表现为对输出对外界的不同破坏性灾害链。

(2) 上述转化的发生概率需要首先根据情景库和规则库的专家知识给出先验概率，并根据所掌握信息的完善和情景的丰富而给出修正概率。

因此，非常规突发事件的演化既具有广义系统演化的阶段性特征，同时又具有自身的特殊性。即突发事件从发生到结束的演化过程，始终是一个自然能量释放与决策者应对不断交互演进的过程。从事件自然发展的角度看，事件将始终沿着自然发展的随机路径逐步发展，在自然规律作用下对外界系统释放或交换能量，随着能量的释放而使自身对外界的影响或破坏逐渐最大化，达到系统的“自然极值状态”<sup>[103]</sup>。而从决策者应对的角度看，决策者在发现非常规突发事件后，不断将应对措施作用于事件过程中，如果应对措施有效，则事件的发展状态就会被决策主体的应对措施不断改变，并减少对外界的影响和破坏，直至事件完全被处置而不再影响外界。因此，本质上，对各类非常规突发事件来讲，发展过程都是事件自身和应对措施综合作用的内外状态变化过程。其起始点是事件自身能量的积聚，如果有适当的引导可以让能量在聚集的过程中自然释放，那么事件的自身内在能量可能已不足以引起外界状态的变化，突发事件也就不会发生。反之，事件的自身能量一直积聚到自身承载能量的极限，则表现为突发事件的突然爆发，并根据外界的情况不断变化能量释放的后果，即事件不断发展和演化。这个过程中，不同的孕灾环境、承灾体、应对措施等要素的状态对事件的发展可能起到阻碍或推动的作用，或引发衍生次生灾害的扩展性演化、或逐渐衰减直至事件结束，因此会发生不同的演化路径。根据广

义系统演化的四阶段划分，突发事件的演化过程可以分为发生、发展、演变和终结四个阶段。下面分别讨论四个阶段的情境演化特征。

### 1. 发生阶段

非常规突发事件的典型特征之一是发生前无明显征兆或根本没有任何征兆。以地震为例，在科学高度发达的今天，仍然也只能做到在震前几秒才能探测到震动，因而还根本无法对这类灾害事件进行预测。因此，从时间角度分析，能够实时得到的非常规突发事件初始实时情景所反映的时间点是在事件发生后，即初始情景通常反映的是决策者开始应对决策的时间点，而不是事件发生的时间点。因此，对于非常规突发事件发生后的初始时间点的情景，通常只能通过结合历史情境和实时情境信息进行重构才能得到。

### 2. 发展阶段

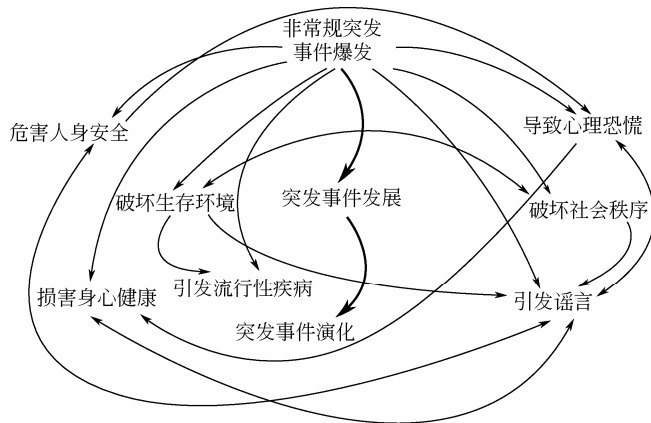
非常规突发事件的发展表现为灾害破坏在时空和程度范围上的纵深扩展，即对承灾体的破坏程度和对外界系统的整体破坏性开始增强，并开始影响破坏更多的承灾体。承载体的不断增加和变化，标志着事件情境在事件状态这一层次开始频繁变化。从事件发展阶段的过程角度分析，非常规突发事件可以分为两类：一类是自身发展阶段较为短暂，而迅速进入次生、衍生灾害的事件演变阶段。比如地震，通常地震本身发生后很快就结束了，发展过程非常短暂。但很快就进入山洪、瘟疫、暴乱等演变灾害中。这类事件的情境演化中应重点关注事件自身与次生、衍生事件的情境关联变化，通过事件链情境层次的情境重构去了解、挖掘多事件之间的关联和演化规律，从而在决策上可以提前布局，并集中力量控制次生与衍生灾害的发生。另一类是事件自身发展的持续时间比较长，并持续加强对外界环境和承灾体的破坏力度和影响范围。例如，泥石流灾害发生后，通常不会很快结束，



而是会经历一个范围扩大、破坏力增强的阶段。这类事件的重构应重点关注在事件状态和因素情境层次的情景分析，控制事件进入演变阶段，尽量将事件控制在自身发展的范围内，避免更大范围的事件影响。

### 3. 演变阶段

非常规突发事件的演变是发展阶段的后续，它表明事件已经进入更深层次的演化阶段，即产生更多层次的事件情境，并有可能在多个情境层次上发生共性演化。例如，冰雪灾害造成的电网破坏事件，在演化阶段，随着电网自身的线路、设备等在状态情境层次的破坏情景的深入，可能同时伴随着在事件链层次上的交通瘫痪、危害人身安全、人群恐慌等情景演化，如图 2-5 所示。演变阶段和发展阶段最大的区别在于：发展只是事件自身情境层次上的时空范围和程度上的量变，而演变则明显表现为发生了质变导致的次生、衍生事件，即事件链情境层次上必然发生了情景演化。也就是说，原生事件的演变阶段通常包含衍生、次生事件的发生和发展阶段。因此，这一阶段的情境层次和构成最为复杂，也是情境重构的重点和难点。



◎ 图 2-5 非常规突发事件的演化方式

非常规突发事件的情境演化可以分为以下三种类型。

### （1）连锁式情境演化

连锁式情境演化是指突发事件演化构成中，在同一个情境层次上的主要情景因先后次序关系而形成互为因果的接连发展，即先发情景成为后发情景的诱发因素。例如，2011年3月11日日本发生大地震，并引发了海啸和核泄漏，灾害几乎影响了整个日本。从地震到海啸和核扩散，实质上就是在事件链情境层次上的一种连锁式扩散。在连锁式演化中，情景之间通常表现为单一的因果关系，而后续情景也常常表现出更大规模的破坏性，因此该类型演化应重点分析单层情境内的情境重构规律，尽量通过控制前因情景的发生，达到避免结果情景发生的控制目标。

### （2）扩散式情境演化

在扩散式情境演化中，演化结构中各要素的关系是多个因素造成多个结果的关系结构，是突发事件产生的直接破坏和间接影响在社会系统中的扩展和发散。例如，大地震首先是破坏房屋、道路等基础设施，进而可能引发洪水等灾害，破坏正常生活秩序或引发大规模疫情，从而造成大众心理的恐慌，这些衍生次生事件在灾害持续时间和破坏程度上都是对非常规突发事件的灾害影响的一种扩散，增加了突发事件应对的复杂性。扩散式情境演化的主要特征是情境演化的情境并不集中于一个层次，而可能是在多个层次情境之间的并行交互演化，从而形成情景之间的复杂的因果关系，在重构表达上除了需要描述和重构同层次情境中的情景关联关系，还应表现不同层次情境之间的递进演化关系。

### （3）循环式情境演化

循环式情境演化是情境演化结构中原因结果自反馈的一种关系结构，表现为事件初始情景在依次引发其他灾害情景后又重新引发事件初始情景，并在情景的破坏烈度上有所加强。例如，自然灾害突发后物资缺乏将导致物价上涨的情景，随后可能导致人员恐慌，恐慌情绪的蔓延导致人们哄抢购物，事件重新演化到物价上涨的情景。循环式情境演化的结构特点是某些情景既是原因情境又是结果情景，在情境重构表达上表现为形成自环的情景序列。

### 4. 终结阶段

突发事件的终结并不能与传统意义上的事件结束完全对应，它主要是指从致灾因子的致灾能力逐渐减弱、对承灾体的影响破坏减小直至突发事件影响消失的这一段过程。终结阶段的结束情景通常也是整个突发事件的结束情景，它可能是在事件的自然发展动力终结后（如气压气流稳定后台风的自动消失）或人为应对措施产生作用后（如人工降雨缓解大面积干旱灾害）形成的。

## 2.6 本章小结

---

本章在“情景-应对”的模式框架下，界定了非常规突发事件的情景、情境和情境重构等概念的内涵和关联关系；针对情境重构的目标，从情境表达要素和描述方法、情境网络构造及描述、情境重构方法及可视化仿真模拟等研究角度研究了非常规突发事件情境重构的机制并提出了情境重构的体系构成，重点分析了情境要素设计和情境演化机理。在情境表达要素

分析中，按照影响情境结构和情境驱动两个角度分析、整理了情境构成要素；在情境演化机理分析中，将用来解释非常规突发事件演化的突变理论和生命周期理论视角进行综合，从情境演变的角度，分析了非常规突发事件在发生、发展、演变和终结四个演化阶段过程的特征和机理，并对应分析了各个阶段对情境构造和演化分析的特征需求；针对上述需求，分别从非常规突发事件情境演化的特性层面分析总结了情境重构需要解决的现实问题。



## 第 3 章

# 非常规突发事件情境描述方法

- 3.1 情境的多源信息融合处理
- 3.2 情境本体设计
- 3.3 基于本体的情境网络设计
- 3.4 本章小结



非常规突发事件是一个涉及人、物和环境等诸多因素并受到这些因素共同制约的复杂大系统，系统的随机性明显，动态演化尤为复杂。对非常规突发事件情景和动态情境进行清晰、准确的描述是辅助相关决策人员了解事件状况，对事件理解达成共识的重要条件，也是分析情景之间的因果情境关联，进行情境重构的首要基础。因此，情境重构模型的构建需要在事件信息处理、情境描述等方面提供方法来支持。当前，在非常规突发事件的信息集成，以及情景和动态情境的描述层面还缺乏通用、有效的方法，影响了对事件的识别和分析，给应对决策造成了巨大的困难。本章将主要讨论情境重构模型构建中的本体描述，分析非常规突发事件的信息处理，构造多层次的情境网络描述方法。

### 3.1 情境的多源信息融合处理

---

由第2章中情境的概念界定可知，情境是在信息基础上对事件要素的抽象与组合。事件信息是情境构造要素的来源，也是情境体系的基础。因此，非常规突发事件情境构造的一个研究要点就是信息处理工作。从多源、异构的事件情境信息源中及时、客观、准确地收集信息，并快速、高效地规范化有用信息用以构造情境，为了解形势、分析问题、制定策略快速提供参考数据，已经成为提高突发事件应对能力的一个重要方面，也是衡量突发事件应对能力的一个重要指标。非常规突发事件情境信息的种类、来源众多，其中包括了事件相关的时空位置、环境、组织、设施状态及决策者的决策活动信息等，涉及突发事件的历史资料信息、预案信息、接处警信息、现场信息、可供调度的资源信息、辅助决策信息、指挥调度信息、面



向公众发布的新闻报道信息等。非常规突发事件的情境描述方法需要面向用户对事件情境重构的不同需求层次,对信息进行接收、处理、传输、存储、分发等操作,为情境重构提供高质量的信息。因此,为非常规突发事件建立情境描述体系的首要工作就是要明确情境重构的信息需求和信息来源。

### 3.1.1 情境信息分类及来源

所谓非常规突发事件的情境信息,就是指与非常规突发事件情境相关的一切信息,即构造情境要素所需要的一切信息。这些信息呈现出多样化、多源、异构,并且具有极强的不确定性等特点。以地震信息为例,地震的震级等专业数据需要从地震局获取,而地区相关建筑物、关键设施等数据需要从建设部等部门获取,地震地区的人员数量及人口分布需要从民政部、公安部等部门获取。在进行针对性的信息融合处理之前,必须对情境信息进行有效的分类划分,分析各类数据的特点和处理方式。根据不同的分类方式,可以对事件信息进行如下分类。

#### (1) 按照信息类型划分

① 情境的时间信息 (Time): 包含事件情境发生、发展的季节、日期、时间点和经历时段等。

② 情境的空间信息 (Space): 空间信息主要是从 GIS 中获取或由其他系统提供的 GIS 信息,包括采用 GIS 的坐标系统进行描述的事件情境发生地点、关键设施分布的地理地形等情境相关的空间位置信息。

③ 情境的设施信息 (Infrastructure): 包括事件空间所涉及的关键设施的性能参数及运行状态等信息。

④ 情境的环境气象信息 (Environment): 包含事件发生的环境和气象

条件信息，如温度、湿度和风力雷电等信息。

⑤ 情境的组织、人员信息（**Organization and Persons**）：非常规突发事件的应对过程涉及众多的行政组织和部门的决策人员，除了它们的基本信息之外，还包括了对决策的相关偏好等信息，这些信息也是情境信息的重要组成部分。

⑥ 社会信息（**Society**）：包括事件相关的人员分布、社会状况等社会信息。

## （2）按照信息产生方式划分

① 历史的情境信息（**History Context**）：这类情境信息不是事件的实时情境信息，而是通过对历史上的非常规突发事件进行总结得到的。可以通过历史信息库、预案库、情境库等信息数据的接口获得，利用这类数据的规律可以增进对当前突发事件情境的理解，也可以在信息不完备的情况下，作为当前非常规突发事件情境信息的有效补充。

② 实时的情境信息（**Real-time Context**）：这类情境信息能最大化地反映出非常规突发事件的实时情况，通常是根据事件的变化而不断变化的，往往需要从事件监测网络中进行实时提取，或依靠相关人员在现场的实时反馈得到，如地震震中区域的现场湿度、通信设施状况等。在非常规突发事件初期，由于事件的巨大破坏力常常破坏监测网络，此类实时信息往往是缺失的。

③ 模拟的情境信息（**Simulated Context**）：这类情境信息通常是结合历史情境和实时情境并通过推理、演算等方式模拟出来的，比如通过现场勘测到的地震对大坝的破坏信息，根据大坝水位的相关信息计算、推理，得出洪水冲毁大坝的可能情境信息。

### （3）按照信息获取渠道划分

按照信息获取渠道角度，分为事件系统内部信息和外部信息。以复杂电网灾害的情境信息为例：

① 复杂电网的内部信息包括电网保护系统和电力线路故障监测信息、电网结构信息、系统设备等信息。

② 复杂电网的外部信息包括电网部署区域的地质灾害信息、当地的气象信息等。

### （4）按照信息存储和呈现的方式划分

按照信息存储和呈现的方式可分为数字文字信息、专业化文档信息、图像信息、影音多媒体信息等。

## 3.1.2 面向知识的情境信息融合方法

### 1. 多源信息获取

要提高非常规突发事件的情境描述和情境重构能力，一个很重要的前提和手段就是要获取尽可能详细、具体的突发事件信息。而非常规突发事件过程中，信息缺失与信息爆炸交替发生，多源、异构信息众多，需要考虑特殊的方法建立数据系统对信息进行获取。针对多种类、不同特征的情境信息，可以采取以下几种方式获取信息。

#### （1）可实时捕获的情境信息

非常规突发事件的实时数据需要通过监测系统的实时监测获得，因此，可以采用实时网络通信技术，在监测系统和信息融合系统建立数据即时通信接口，实时推送情境信息给信息融合系统。例如，建立和气象信息的接口，可以实时接收到事件区域的雷电、雨雪等气象信息；建立和电网设备监测系统的信息接口，可以实时接收到电网设备的保护故障信息等。需要

注意的是，一旦突发事件爆发，上述监测网络和设备都可能被破坏。因此，这类信息往往在事件爆发后的短时间内无法被获取，而转变成为不可实时捕获的情境数据。

### （2）不可实时捕获的情境数据

这类数据虽然从情境信息角度看是关于事件现场实时的情境信息，但通常由于环境、设备、接口条件等原因不能实时捕获到，而需要通过一定的数据捕获方法在最短的时间内完成信息收集，从而尽量降低在数据实时性上的延迟。例如，事件爆发区域的地质灾害等信息，需要通过人为采集等方法回传到数据系统处理。

### （3）情境的历史数据

历史数据主要是指与某次非常规突发事件相类似的历史事件信息，收集这类信息所需要的工作通常是建立数据转换的接口。因为历史事件的预案、案例、情境等信息都已存储在相关的信息库中，只要建立了相适应的数据转换接口即可将数据转为标准化数据供新的数据系统使用。

上述信息获取方式在非常规突发事件的发生、发展过程中需要相互配合共同使用，为提高获取的效率，还需要从以下几个方面加强辅助工作：

首先，在平时的应急准备过程中要加强应急管理信息系统的建设，培训管理人员建立卓越的突发事件防范意识，重视历史数据的作用，通过平常的信息积累丰富事件相关的信息库、预案库、案例库、情境库的建设，随时为决策者提供全面、高质量的事件情境信息。

其次，要对事件中涉及的历史数据、实时数据、模拟数据经常进行相互整合和验证，保证实时数据和模拟数据在满足条件后及时存入历史信息库中，并实时演练多个信息库的互联互通，以便在事件发生后提高信息反馈的效率和准确度。

最后,要不断挖掘情境信息存储、显示等新技术的应用。信息电子化技术的不断深入,已将信息的应用提升到了一个新的高度。原来需要用枯燥的数字、文字等反映的信息已不断被多媒体技术所替代,原来二维的平面显示方式也逐渐被更为生动、逼真的三维场景呈现所替代。这些技术都将很好地促进情境信息的挖掘和利用,但也要求在信息获取、整理这一环节中尽可能地掌握新技术的使用,为新技术的使用建立基础。

以雪灾事件为例,综合利用上述多种方式进行多源信息获取和处理的过程描述如下:

(1) 通过与气象系统的实时接口,获取温度、降水等信息。将这些信息存储在历史信息库中,在预防、准备阶段,可以利用这些数据进行雪灾防护相关的准备工作。

(2) 通过与民政部、规划部等职能部门的数据接口,捕获目标区域的人员、畜牧、地理地形、设备设施等数据,存储在信息库中备用。

(3) 在初步开始降雪后,通过地面的实时监测系统,收集积雪厚度和范围等数据。

(4) 通过将上述信息提交给数据融合系统处理,利用情境描述和重构,可以综合得到雪灾等相关情境的模拟信息,根据模拟情境进行决策,可以做出灾情预报等应急准备工作。

(5) 在雪灾已经发生的情况下,进一步收集上述信息,并进行补充、修正,利用最新信息重新描述灾害情境和情境重构,支持启动预案、布置应急行动等进一步决策分析。

## 2. 多源信息融合方法

在集成多源异构的数据信息时,目前一般采用三种方法来处理多源异构数据之间的交互和集成问题:

(1) 在数据库层面, 利用数据库工具进行数据库之间的直接转换, 从而达到将全部数据集成在一个通用数据库的目的。

(2) 通过对所有数据进行标准格式的转换实现目的。例如, 对不同类型的数据, 利用一些通用性工具将多源异构数据全部转换为 XML 等标准格式, 完成数据的集成。

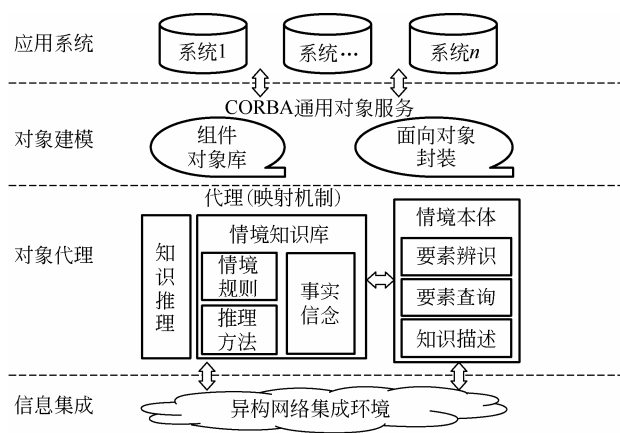
(3) 构建领域内的专有数据格式, 并建立转换工具将全部数据转换成这种专有格式, 完成数据的集成。

在上述三种集成方法中, 以第一种的应用范围最受限制, 因为当前对数据库中数据结构的设计还没有形成标准, 各行各业的各个应用都是各自为战。这也就决定了在非常规突发事件中, 在数据库层面集成各个系统的数据必然是一项耗时、耗资源的活动, 几乎是一项不可能完成的任务。因此, 为集成非常规突发事件情境描述所需要的各类数据, 除了在平时的应对准备中花费更多精力进行数据准备外, 还必须研究在应对中能够快速而方便地完成多源信息融合的方法。

当前在集成构建集成框架方面, 主流的技术主要是公共对象请求代理体系结构 (Common Object Request Broker Architecture, CORBA) 规范<sup>[104]</sup>和微软的 DCOM 体系。考虑到体系的开放性等因素, 本书采用 CORBA 体系来实现多源异构信息的集成, 它是由对象管理组织 (OMG) 制订的一种标准的面向对象应用程序体系规范, 或者说 CORBA 体系结构是 OMG 为解决分布式处理环境 (DCE) 中, 硬件和软件系统的互连而提出的一种解决方案。CORBA 的原理是建立了一个标准的分布式体系结构, 并统一使用一种接口定义语言 (Interface Description Language, IDL) 用于刻画组件呈现出来的接口, 使得布置在其中的对象能够按照事先约定的规范通过接口进行通信和互相操作<sup>[105]</sup>。这样, 只要保证对象的输入输出接口是满足

CORBA 规范的, 就可以部署在体系中的任意节点, 并通过规范化的接口最终实现对象级别的软件可重用和可移植。可见, 要让一个原本并不是按照 CORBA 规范设计的应用系统部署在 CORBA 体系中与其他组件进行交互, 必须满足两个条件: 一是系统应该是面向对象的, 才能成为 CORBA 中的对象组件; 二是必须在接口和操作上满足 CORBA 规范。这就要求在集成之前必须对众多不符合 CORBA 规范的系统进行一次规范化转换操作。对应的, 转换操作包含两个部分: 一是对未采用面向对象设计的系统重新进行面向对象建模。建模的重点应放在待转换系统可能与其他系统进行交互操作的环节上, 因此并不需要将系统中全部组件都重新建模, 而是需要对可能与其他系统进行通信和互操作的数据相关组件进行面向对象建模, 而对系统内部访问和操作的数据组件则可以仍然保留原有的设计模式。即只需要通过对系统的组件服务进行全面分析后, 找出那些从其他系统接收服务以及自身对其他系统输出服务的组件部分重新进行建模封装, 如此可大大减少模型转换的工作量。二是按照规范对系统接口和操作重新进行封装, 使之完全符合体系中的互操作规约, 并最终形成支持系统之间集成和扩展的公共请求代理。

本书设计的面向知识的多源异构信息集成方法的结构如图 3-1 所示, 该方法基于 CORBA 体系的设计思想和规范, 围绕非常规突发事件的应急领域建立知识, 通过建立不同类型的知识对象代理 (broker) 来实现对信息访问和存储的服务请求。根据非常规突发事件情境重构的现实需求, 系统中的代理设计为本体情境代理 (情境要素的知识表示)、情境知识库代理 (关于情境的描述目标、关联规则及代理信念等) 和知识的推理规则运用三种代理。关于本体情境和情境推理规则的设计将在本书后续章节中进行详细介绍, 下面首先先介绍对情境知识库的设计思路。



◎ 图 3-1 面向知识的多源异构信息集成方法的结构

### 3. 情境知识库的建立

多源信息融合的目标之一是建立一个随时能满足情境系统信息需求的情境知识库，包括情境信息数据和情境知识两个部分。以面向电网灾害的应急为例，情境知识库中的信息必须依赖丰富而精确的各相关专业数据，因此，信息数据的建立主要包括相关数据库和情境要素库的集成建立，需要涵盖基础地理信息数据、行政综合信息数据、气象探测数据、地质信息数据、电网系统专业数据及应急预案和救灾数据等。

#### （1）基础地理信息数据

基础地理信息数据是情境中孕灾环境、承灾体等要素分析所必备的信息数据，也是实现非常规突发事件情境在 GIS 空间中空间叠加呈现的必要基础。基础地理信息数据包括大地测量数据（纵深范围、坡度等）、数字线划图数据〔交通路线、水域、海岸线、地形地势等高线等，各级行政区域（省、市、区县、乡镇等）界线标注、数字栅格、地图数据建筑物和交通设施、重要市政机构、主要居民小区、医院、银行、学



校、公安局等] 等类型, 存储形式为比例尺精度不一的区域规划图、地貌地形图等图形文件。

### (2) 行政综合信息

为更好地分析承灾体相关要素, 需要行政综合信息提供人口数量、人口结构及居住分布, 区域内农业及工业生产的综合信息, 区域内相关设施的部署位置、参考指标和注意事项等。

### (3) 气象探测数据

气象因素常常是自然灾害发生的主要致灾因子, 因此, 气象数据的精准度与实时性是直接影响情境要素属性, 尤其是致灾因子要素设置的主要数据。气象探测数据主要包括气旋与大风等级、方向、路径和范围, 降水降雪强度范围、时间, 大气温差与变化趋势, 雷电级别、强度和持续时间等。气象探测数据属于专业数据的一种, 数据主要有地面有线遥测气象站、高空无线遥测气象站的实时监测数据和历史信息库中存储的历史气象信息等。

### (4) 地质信息数据

由于自然灾害类的非常规突发事件的首要直接承灾体常常是地理对象, 然后通过演变为衍生、次生灾害产生对外界更大的灾害破坏, 所以在事件情境要素信息集成中必须考虑地质信息数据。地质信息数据包括事件区域的地表地貌、版块构造、地质断裂带数据、山体、丘陵、植被信息。这些数据可以为地震等非常规突发事件中的山体滑坡、泥石流等情境要素提供信息数据。

### (5) 电网系统专业数据

电网系统的专业数据包括电网线路的架设路径、电力设备的额定功率、抗拉、抗压、抗冷热等参数, 以及各种电网相关设施在运行中的实时监测

数据，如潮流值、传输峰值<sup>[106]</sup>。

## 3.2 情境本体设计

**前提假设：**非常规突发事件中的任何一个情景都不是孤立的，而是在一定情境层次上可以找到与之存在因果关系的另一组情景，组合构成情景序偶。某些特殊情景可能在一定时间段内表现为自身的延续，即不直接转化为存在因果对应关系的后续情景，针对这类情景，本书将其定义为自身形成的自耦合序偶，即在这种情景序偶中，前因情景和结果情景均为该情景（集合）自身。

**定义 3-1：**将情景表示为六元组  $S = \{T, N, H, L, E, R\}$ 。

式中， $T$ ——时间戳要素，描述该情景的时间窗口属性。

$N$ ——事件链要素，是一个由事件链属性状态构成的向量，表示为

$$N = (n_1, n_2, \dots, n_n)^T。$$

$H$ ——致灾因子要素，是一个由致灾因子属性状态构成的向量，表示

为  $H = (h_1, h_2, \dots, h_n)^T$ ，以台风致灾因子为例，其状态参量包括台风强度、风速、风向等。对于包含多致灾因子的情景，可以按致灾因子的不同进行拆分，直到只包含单独致灾因子为止。

$L$ ——承灾体要素，是一个由承灾体属性状态构成的向量，表示为

$L = (l_1, l_2, \dots, l_n)^T$ ，以台风经过的电塔为例，电塔的状态参量包括高度、面积、建筑材料、建筑时间等。

$E$ ——孕灾环境要素，是一个由孕灾环境属性状态构成的向量，表示

为  $E = (e_1, e_2, \dots, e_n)^T$ ，以台风为例，孕灾环境参量包括季节、

温度、湿度、坡度等。

$R$ ——致灾因子、环境、承灾体三个要素对当前事件情景的模糊关系，表示为  $R = (h, l, e)$ 。

**定义 3-2:** 情景序偶  $k = \{IS, OS, T_s\}$ 。

式中， $IS = \{IS_1, IS_2, \dots, IS_m\}, m \in Z^+$ ，表示序偶中的前因情景集（Input Senario Set），由  $m$  个表示情境的初始情景构成，是情境驱动要素产生作用的对象和前提条件，记为  $\text{Pre}(k)$ ；

$OS = \{OS_1, OS_2, \dots, OS_n\}, n \in Z^+$ ，表示序偶中的结果情景集（Output Senario Set），由  $n$  个表征转换之后的事件情景构成，是作用因子活动后所产生的结果，记为  $\text{Post}(k)$ ；

前因情景集和结果情景集统称为序偶中的情景集  $S$ ，有  $S = IS \cup OS \neq \emptyset$ ；

$T_s$ ——记为  $T_{sIS}^{OS} = (h^y, l^d, e)$ ，称为情境驱动要素的效用矩阵。元  $7D20T_{s_y}$  表示  $IS_i$  情景变迁到情景  $OS_j$ （孕灾环境  $e$  中，强度为  $y$  的致灾因子  $h$  作用在承灾体  $K$  上时产生了强度  $d$  的灾害损失）的模糊概率，其量化值表示在情境驱动要素活动作用下，由前因情景变迁为结果情景的概率，取值通常采用以下两种方法：基于经验数据法（专家知识库）和基于最乐（悲）观估计法给出先验概率，并随着事件情境的完善而用后验概率进行修正。

**定义 3-3:** 设  $K = \{k_m\}, m \in Z^+$ ，是一个有限情景序偶的集合。设  $k_i, k_j \in K$ ，若  $\text{Post}(k_i) \cap \text{Pre}(k_j) \neq \emptyset$ ，则称序偶  $k_i, k_j$  之间有联系，记作  $\langle k_i, k_j \rangle$ 。这里，称  $k_i$  为前导序偶， $k_j$  为  $k_i$  的后续序偶。

考虑  $\text{Post}(k_i) \cap \text{Pre}(k_j) \neq \emptyset$  的情况，序偶  $k_i, k_j$  之间的联系可以分为四类：

(1) 当  $\text{Post}(k_i) \equiv \text{Pre}(k_j)$  时，若  $k_i$  发生，则可以导致序偶  $k_j$  发生；

(2) 当  $\text{Post}(k_i) \supset \text{Pre}(k_j)$  时, 若  $k_i$  发生, 则不仅有序偶  $k_j$  发生, 还可能有序偶发生, 即情景序列可能产生分支;

(3) 当  $\text{Post}(k_i) \subset \text{Pre}(k_j)$  时,  $k_i$  发生是  $k_j$  发生的前提之一, 即还需要其他序偶的发生  $k_j$  才能发生;

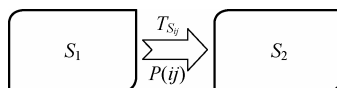
(4) 当  $\text{Post}(k_i) \not\subset \text{Pre}(k_j)$  且  $\text{Pre}(k_j) \not\subset \text{Post}(k_i)$  时, 只有满足  $k_i$  和其他序偶都发生的前提,  $k_j$  才能发生, 同时也可能导致产生情景序列的分支。

**定义 3-4:** 情景序列指的是两个或多个情景序偶相互联系组成的一个序列。 $\Theta$  为一个二元组, 即  $\Theta = [M, R]$ 。其中:

$M := \{m_i\}$  为情景序偶集;

$R := \{< m_i, m_j >\}$ , 为情景联系的集合。



将构造的全部情景根据情境库的关联规则和专家知识进行互相匹配后, 可以初步得到一个情景序列, 在这个情景序列中很可能会存在多个情景互相重复匹配的情况, 即出现图 3-2 所示的复杂情景序偶。因此, 在情景序列中会出现复杂情景序偶和简单情景序偶并列的情况, 为对情景序列进行规范化, 对它们的合成与分解是一个有效的手段。在同一个情境范围内, 相互有联系并且有共同单一结果情景的几个简单情景序偶可以由一个单独的复杂情景元素替代, 这个过程就是事件情景序偶的合成过程; 反之, 将一个复杂情景序偶转换成在情境范围内几个有共同单一前因情景集的简单情景序偶就是情景分解的过程。情景序列的合成与分解可以通过表 3-1 所示的一系列符号进行标注。依照因果情景关系建立关系图, 并



◎ 图 3-2 情景之间的关联关系示意

运用情景序偶的合成与分解进行情景序列的规范化，对特定的非常规突发事件演化过程做逐层次的深入的情境分析。

表 3-1 情景序列的主要描述符号

符号	情境关系说明
	与门：表示只有前导情景序偶 $C_1$ 、 $C_2$ 都发生时，后续情景 $C$ 才发生。即只要有二者中任意一个前导情景不发生，则后续情景就不会出现。更多个情景下的与门也是同理。
	或门：表示前导情景序偶中任一情景发生时，后续情景 $C$ 发生。即只有全部前导情景都不发生的情况下，后续情景才不会出现。更多个情景序偶的或门也是同理。

假设在情景序列  $\Theta=[M,R]$  中， $m_0$  是情景序列中的一个情景序偶：

- (1) 若  $\forall c \in C. <c, c_0 > \notin R$ ，则称  $c_0$  为序列的起始情景序偶，即在一个情景序列中不存在前导序偶的情景序偶，记作  $Fc$ ；
- (2) 若  $\forall c \in C. <c_0, c > \notin R$ ，则称  $c_0$  为序列的终止情景序偶，即同一情景序列中不存在后续序偶的情景序偶，记作  $Ec$ 。

**定义 3-5：** 情境  $C$  用一个二元组  $C=\{E,\Theta\}$  表示。

式中， $E$  ——称为情境的实体 (Reality)，是情境所反映的客观世界现实抽象，它具备该情境区别于其他情境的要素特征，标明情境的逻辑层次，是对非常规事件的一个实体抽象；  
 $\Theta$  ——该情境中的情景序列。

### 3.3 基于本体的情境网络设计

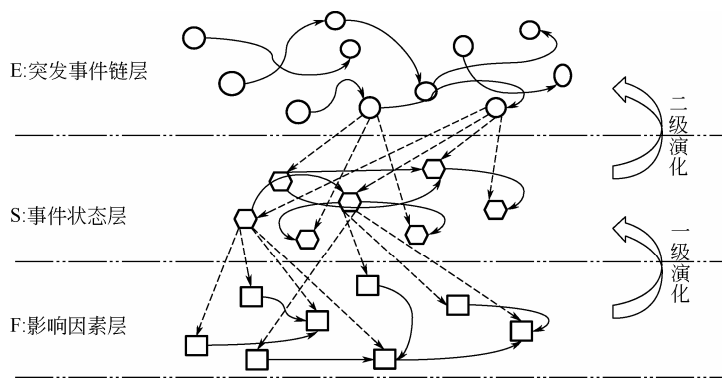
根据系统论的观点，可以认为非常规突发事件的演化过程是由于系统

的内外部影响因素的变化综合促成了系统情景的变化和异常,并最终导致了事件的爆发和衍生次生事件的发生,是在影响因素、事件状态和突发事件链三个情境层次上的因果过程,不同层次上的情景和关联情境构成了层次化的情境网络。在明确了非常规突发事件情境构成要素和建立了多源信息融合方法的基础上,情境描述方法主要包含情境本体设计、情境网络结构构造和情境描述语言及过程设计。

### 3.3.1 三层情境网络结构

根据对事件信息的获取程度和对情境的划分粒度,可以划分出不同层次的事件情境。基于非常规突发事件的层次演化机理,本书提出基于影响因素情境层-事件状态情境层-突发事件链破坏情境层的三层情境描述网络,如图 3-3 所示。三层结构由上至下分别为突发事件链层、事件状态层和影响因素层。突发事件链层呈现的是原发事件、衍生次生事件之间的情境网络结构,这一层次的情境转换以事件之间的演化变化为标志。例如,在日本的手纸抢购事件、生活用品抢购事件、银行挤兑事件等事件之间构成的宏观情境演化关系网络。而第二层次的事件状态层呈现的是突发事件各个阶段的不同状态情境之间的关系网络,这一层次的情境转换以事件内部的状态变迁为标志。例如,手纸事件中的对手纸短缺的怀疑、媒体广泛报道、对生活用品短缺的怀疑、对金融危机的担心等事件状态之间构成的情境演化关系。第三层次的影响因素层呈现的则是由诱发、加剧或减缓事件的等众多因素构成的情境关系网络,这一层次的情境转换通常是以致灾因子等诱发因素的变化为标志。例如,对生活用品短缺的怀疑是由当时的经济因素情境、社会关系构成因素情境、民众心理因素情境、信息传播情境等因素构成的。三个层次上的因果网络之间也具有一定的因果演化关系,

即纵向上包含了影响因素情境层与事件状态情境层之间、事件状态情境层与突发事件破坏情境层之间的两级因果情境演化关系。



◎ 图 3-3 突发事件情境演化三层网络

1. 因子情境层

因子情境层重点关注情境要素的属性因子性质对事件情境网络的影响。根据前文对情境要素的分析和设置，因子情境层的分析对象主要包括分析致灾因子、孕灾环境、载体及应对措施。

（1）事件的不同致灾因子。不同性质的非常规突发事件具有不同的演化能量。以自然灾害类突发事件为例，该类性质的突发事件较其他类型事件更容易产生变异和演化扩散，如地震爆发后除了直接破坏外，还可能引发水灾、火灾、易燃、易爆、有毒物质的渗漏、大规模疫情等破坏。

（2）孕灾环境和承灾体的性质，如是否具有产生其他灾害事件的特殊地理地质特性、主要建筑物是否符合抗灾设计、管理和服务系统是否具有容错和恢复能力、关键基础设施的脆弱性能否达标、是否会引起关联故障等。

(3) 应对体系和应对措施的性质。包括事件涉及区域的指挥部门是否有完善的应对体系可以有效降低突发事件的损失,在平常时期是否有相关的应急演练措施等。

## 2. 状态情境层

事件的某种状态情境反映在某一时刻某类因素对事件影响的一种结果,即反映了事件的某一侧面情境的一种描述。从总体上来讲,这些状态可以分为组织层面、设备层面、信息层面等。同时,针对具体的突发事件,可以在上述相关因素网络的基础上扩展构建新的相关网络。从网络构建的拓扑结构上,它们具有一定的共性特征。但在具体的点、边、权设置上,则需要对不同的属性网络进行独立研究。

### (1) 组织网络

采取将非常规突发事件相关的行动/决策组织作为网络节点,将组织之间的隶属关系作为网络的有向边,将组织权限/应急调控权限作为网络节点的权,形成有向有权的组织网络结构。

### (2) 信息网络

包括面向全社会的舆情信息网络和事件调控信息的政府信息网络两种网络。对于行政信息网络,以中央政府、省级政府、市级政府、地县级政府的多层次信息中心为网络节点,节点之间的边表示不同信息中心之间的信息传递关系,形成非常规突发事件的行政信息传播网络。对于舆情信息网络,则以突发事件信息传播中的信息源为网络节点,信息源既包括各类相关媒体,也包括口口传播过程中的个人传播者。以节点之间的有向边表示信息源之间直接发生的传播与被传播关系,节点权重表示信息源的传播能力(例如,主流媒体>非主流媒体>个人传播者)。



### (3) 设施网络

设施网络包括通信、交通、水电气供应等相关设施网络。针对具体的突发事件，可以有选择性地突出某类设施网络对突发事件的演化影响。结合我国设施网络的现实状况分别构建拓扑表达如下：

① 水电气等供应网络：以现实的供应节点（变电站、水电站等）作为网络节点，将传输线路定义为网络的有向边，将线路上的传输效率（阻抗等）作为线路权重，形成有向有权的水电气供应网络。

② 交通网络：将突发事件发生环境中的交叉路口或小区对应于节点，而街道对应于弧或边，车辆在边上行驶遇到的阻抗（可以用所花费的行驶时间来描述）对应于边上的权重，抽象成有向加权的交通网络。

③ 通信网络：将包括电视、广播、电话、手机，以及互联网等在内的现实通信节点抽象为网络节点。节点之间的通信线路抽象为网络的边，将节点间的连通能力作为边的权，形成加权的通信网络。网络权重包括节点权与连边权两种权重，分别用来表示节点的重要程度和节点之间的作用强度。根据上述设计，对于某一属性网络  $I$ ，可以将其表示为： $G_I = (I, E_{I-I})$ ，其中， $I = \{i_1, i_2, \dots, i_n\}$  为网络节点集合； $E_{I-I} = \{(k_i, k_j) | \delta(k_i, k_j) = 1\}$  为边的集合， $\delta(k_i, k_j) = 1$  表示节点  $k_i$  与  $k_j$  存在该种属性上的关联意义。

### 3. 事件链情境层

事件之间的破坏关联比较复杂，因为一个事件既可能是由其他事件诱发发生，又可能会引发其他的事件发生，突发事件之间存在连锁反应。等级高、强度大的突发事件爆发后，常常诱发出一连串的次生事件的爆发，或几个突发事件同时发生。而引发的事件的爆发受到底层的相关因素和事件状态变化的影响，具有较大的不确定性。因此，突发事件之间的演化关联关系必须从模糊的角度进行分析与研究。事件之间的关联关系可以细分

为“转化”“蔓延”“衍生”“耦合”四个不同的机理模式。其中，“转化”是指B事件的发生是由A事件引起的，如严重的火灾引发人群的挤踏。而“蔓延”是指一类事件不断发生而引发规模上的扩大，往往一个事件引发一连串的相关事件。“衍生”主要是指一类事件引发另一类事件的伴随发生，即事件B在事件A的发展过程中被引发，并跟随A事件相伴发生，则称B事件与A事件为衍生关联关系。“耦合”是指事件之间的共同作用导致突发事件的进一步加剧，该种关联关系常表现为环式关联路径。

情境网络在纵向上表现为两级演化关系。第一级是因子情景和状态情景的演化，主要应用于事件发生和应对的初期，面向灾情识别及预防的情境重构表达。第二级是状态情景和事件情景的演化，主要应用于事件发生和应对的中后期，面向灾情分析与应对的情境重构表达。

### 3.3.2 情境描述语言选择及描述过程

在“情景-应对”体系中，情境描述是非常规突发事件应急人员了解、掌握事件发生发展的情况，做出有效决策的重要参考。考虑到决策人员面临的强时间约束和承受的巨大心理压力，情境描述必须尽可能规范化、通用化，以避免歧义可能造成的错误理解。因此，选择规范化的描述语言是建立情境描述的一个重要、必要环节。利用规范化的本体语言对突发事件进行描述，需要以情境要素为中心，因此，在应用过程中需要深刻理解与面向对象或面向过程的通用性高级程序化语言的区别。高级语言描述的出发点是将事物抽象成对象，然后才建立对象的各种方法和属性；而本体语言描述的出发点是领域（自然灾害类的非常规突发事件）中的各种本体属性，即各种情境要素的属性，然后利用情境要素属性值来刻画突发事件情

境这一本体对象。既然非常规突发事件情境重构的目标是建立情境关联下的情景序列，需要通过情景之间的因果关联规则进行推理，那么选择描述语言的目标也应该是能够通过情境要素属性得到情境，并描述要素属性之间的规则蕴含。

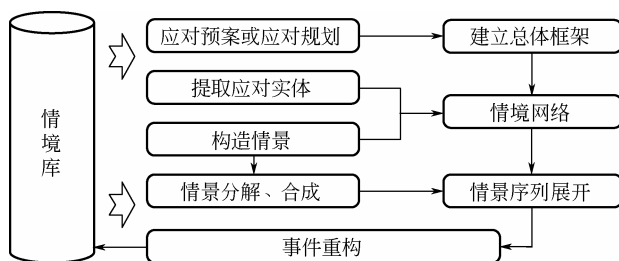
从情境规则推理的实现出发，本书选用本体网络语言 OWL (Ontology Web Language) 来描述非常规突发事件系统空间中的情境实体，考虑的首要出发点是要在非常规突发事件情境重构的情境描述和情境推理这两个重要环节之间，实现一定的平衡，既能有效满足非常规突发事件情境信息描述表达的需求，又能够控制在多层次情境之间进行推理的复杂度，方便可视化仿真模拟的设计与实现。

OWL 语言包含了三个子系列语言，分别是 OWL Full、OWL DL 和 OWL Lite。其中 OWL Full 的表达能力强，但也最为复杂；OWL DL 的表达能力次之；OWL Lite 的表达能力相对最弱，但它用简洁性降低了系统自身可能存在的语义矛盾性，也将推理的难度降到了最低。OWL Lite 的特性表现在三个方面：一是在 OWL Lite 中不再对枚举型 Class 和属性值进行限制，从而在对类和属性进行定义时就脱离了与类实例定义的关联；二是 OWL Lite 禁止了类的并、补和割集关系定义操作，避免了在类层次上的菱形冲突；三是 OWL Lite 将个体基数下限定义为 0 或 1，降低了个体定义的约束。因此，尽管 OWL Lite 出于简洁的目的而削弱了部分语言表达力，但简洁性也使得本体定义中可能出现的语义矛盾大幅减少，在 OWL Lite 之上开发推理的实现也相对更为容易。因而，本书采用 OWL 语言体系中的 OWL Lite 来描述情境本体。

描述过程则是通过定义非常规突发事件中的主要情景构成要素实体，构造情景，对这些情景展开描述，形成情景网络，分析情景之间

的情境关联，按关联关系连接情景，最终得到完整的事件情景序列，完成情境重构。

非常规突发事件情境描述过程如图 3-4 所示。



◎ 图 3-4 非常规突发事件情境描述过程

(1) 从突发事件的整体应对出发，根据突发事件的应对预案或规划，建立非常规突发事件的主要情景集合。集合包含了非常规突发事件的主要情景（根据分类预案和历史事件进行总结），对于缺失情景和关联将通过重构方法在后续进行补充。

(2) 根据相关历史案例和情景库的信息，将情景归属到相应的情境层次中。根据建立情景的粒度，将情景对应划分为情境网络中的三个层次，得到事件的情境网络。

(3) 在不同的情境层次中，根据情景之间的因果关联规则，重构缺失的情景关联关系，并补充关键的情景节点。

(4) 将情景按照时间顺序和因果关系进行关联，形成情景序列图。

(5) 将新的知识输入信息库和情境库。

## 3.4 本章小结

---

非常规突发事件的情境描述包括信息获取与集成、情境网络构造和描述方法三个部分。本章研究了非常规突发事件系统中多源信息的融合方法，为情境描述建立数据基础。分析典型的非常规突发事件情景和情境构成要素，结合集合论和图形化方法建立情境及情景序列的形式化表达，从情境网络的静态结构描述和动态时空演化过程描述两个角度，构建突发事件描述路径和情境描述方法和过程，进而为情境重构模型研究提供描述方法上的基础。

## 第 4 章

# 非常规突发事件情境重构方法

- 4.1 非常规突发事件情境重构途径
  - 4.2 非常规突发事件情境重构流程
  - 4.3 基于模糊情境规则推理的重构方法
  - 4.4 基础设施关联的情境规则设计
  - 4.5 本章小结
-



在非常规突发事件的“情景-应对”范式中，决策是基于动态情境的。如何在事件不同进展阶段，基于事件的不同情境层次而重构事件情景的发生顺序、关联逻辑，使突发事件的决策主体能够实时掌握并预测情景的动态变化规律，从而挖掘并确认具有决定作用的关键决策点，基于多层次情境做出科学、有效的决策就成为非常规突发事件“情景-应对”的关键问题。本章按照非常规突发事件情境重构的途径、程序、重构方法的逻辑，研究非常规突发事件情境重构模型。

## 4.1 非常规突发事件情境重构途径

---

非常规突发事件具有典型的离散事件系统（Discrete Event Systems, DES）特性，由于其破坏力巨大、应对演习演练的风险和费用极高，因而对其更强调基于系统仿真实验的重构途径。离散事件系统的特点是系统状态并不是连续性变化，而是只在某些离散不连续时间点上发生明显的状态变化。在相邻的两个状态变化时间点之间，系统的状态保持稳定或者发生的变化不明显以至于可以被忽略。因此，非常规突发事件的情境重构需要考虑以下难点问题：

（1）受到在事件观测方面的诸多限制，突发事件往往难以建立连续的情景和情境关系描述，这也因此决定了连续时间状态方程等以连续状态为前提的方法在突发事件描述中难以应用，需要通过离散模型来建立在不同观测时间和空间节点上的情景和情境关系。

（2）在事件应对过程中，关键情境要素或其主要属性状态往往难以从实时数据中获取，更多地需要决策者根据应对经验进行推测和决断，因此往往具有明显的随机性和决策者偏好相关特性。



建立基于模糊规则情境推理方法,并通过可视化仿真来考察事件情景状态的发展趋势是解决上述难题的一个思路。基于上述思路,非常规突发事件的重构途径应包括以下三方面内容。

### (1) 情境重构建模

非常规突发事件情境重构建模的基本根据是基于动态情境网络所表示的系统内部情境层次和情景转换关系的分析。根据对事件系统中主要情境的描述,构造情景序列、建立起事件演化过程的情景序列图。这种通过情景序列得到的事件发展图即为非常规突发事件情境重构模型,它是建立计算机可视化仿真系统的基本依据。

### (2) 情境重构仿真

在仿真模型基本确定之后,即可采用计算机程序平台(如 Matlab 平台)及特定的可视化技术搭建仿真系统,通过平台上的仿真对应急决策进行反馈。每次仿真都是对事件的真实社会的一次模拟,并不能充分反映真实社会的复杂性,因此,理论上的仿真反馈是一个多次循环的过程。

### (3) 重构结果分析

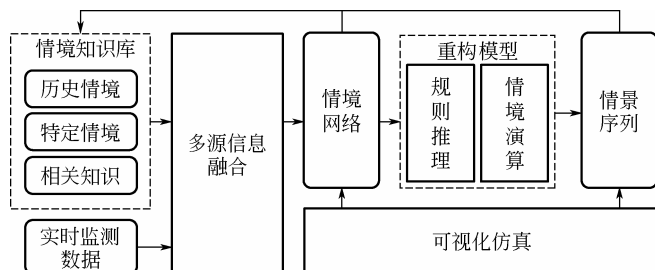
情境重构是对应急准备和实时决策的一种支持手段,在非常规突发事件的重构机制中,应急决策者可以利用相关的决策方法在情境重构基础上进行关键情景、情境演化路径、重点情境的演化概率等量化分析,以及辅助决策者根据上述分析结果提出相关的决策建议。

## 4.2 非常规突发事件情境重构流程

---

非常规突发事件的重构流程如图 4-1 所示,主要包括以下五个主要

环节。



◎ 图 4-1 非常规突发事件的重构流程

### （1）数据处理

“情境”是情境重构的基础，而情境要素则来源于事件过程中所能得到的各种数据。因此，情境重构的首要环节是对事件相关的各种数据进行处理，构造情境要素。其中，支持孕灾环境和承灾体要素的数据大部分属于常规自然数据，可以通过数据库和情境库中的历史数据和知识得到，并可以辅助监测系统中的实时数据随时进行后续的更新；而致灾因子等要素数据则主要来源于实时的监测系统，需要通过监测系统实时捕获。将上述数据随时通过本书 3.1 节介绍的多源信息融合方法进行处理，得到规范化的数据并形成相关知识，进入情境重构的下一流程。

### （2）情境描述及情境网络构造

结合情境库中的案例和现实决策需求，构造非常规突发事件的典型情景并划分情境层次，根据情境库中的规则进行匹配，建立情景之间的序偶关联关系，在不同的情境层次上展开情景序列，构造多层次的情境网络。

### （3）情境关联推理和情境演算

在信息不完备的情况下，信息的缺少会造成部分情景的缺失。针对这

种情况，通过情境知识库和实施反馈得到情境中的作用因子相关概率，通过情境重构模型调用情境关联推理和情境演算方法进一步补充、完善情景序列。情境推理和情境演算的目标是在信息缺失的情况下，补充、完善形成较为完整的突发事件情景序列，根据关键情景节点的情境概率对应对策形成支持。

#### （4）情境可视化仿真交互

通过可视化仿真，支持对情境网络和决策者的双向反馈和实时修订。

#### （5）重构结果分析

根据重构结果，决策者可以进一步选择可用的决策模型，分析事件的相关演化规律，帮助决策者分析关键的情境节点，作为应对决策的依据。最终将相关情境、情景和规则知识等回写存入情境库中。

前两个环节已经在前面的章节中进行了研究分析，以下对第三个环节中涉及的非常规突发事件的情境重构方法进行设计分析。

## 4.3 基于模糊情境规则推理的重构方法

---

非常规突发事件的“情境”体现了一种情景向另一种情景转换的动态特性和关联特征，而通过情境重构所得到的情景序列则尽可能完整地体现了在事件演化过程中的一系列情景的转换过程。在这一过程中，通过“情境”可以反映出突发事件在何种情景状态下通过一系列作用因子的活动作用，以何种可能性可以发生并导致新的情景状态，即可以归结为一种因果关系的动态情境规则。通过情境规则与实时情境的匹配就可以推导出情境的可能发展序列（正演）。原则上，这种规则可以从一定规模的历史案例数

据中挖掘出来或通过一定的推理方法获得，但在非常规突发事件的极端约束条件，如时间压迫、资源紧张、信息匮乏、心理压力、目标冲突等限制下，情境规则挖掘与推理需要在传统的挖掘与推理方法上进行创新。因此，情境规则推理的重构方法需要解决两个问题：①如何在不完备信息系统中挖掘或建立情境之间的关联规则并形成规范化表示；②如何设计高效的规则匹配算法。

#### 4.3.1 模糊情境规则推理概述

在深入基于规则的模糊情境规则推理之前，首先说明非常规突发事件情境重构的情境推理的基本认识和定义。

突发事件情境重构中的模糊规则推理是指分析确立事件情境的结构要素和属性构成，并根据已知信息建立要素属性的状态描述值，并构建驱动要素效用矩阵元素的模糊概率值，通过概率推导，构建情景序偶，从而重构并描述情境中的情景序列。模糊情境规则推理具有如下优点<sup>[107]</sup>：

（1）可以将事件系统的情景要素向量和作用因子等用模糊化的变量来表达，并通过反映事件情景演变的情景序列来描述带有明显不确定性模糊特征的非常规突发事件演化过程。

（2）用规则表示的模糊情境规则推理具有清晰、易于理解掌握的规则表示机制，有助于在重构过程中将推理逻辑和情境描述相互分离。这种分离机制保证了在重构不同类型、机理的非常规突发事件时可以最大限度地对情境描述进行复用。例如，对于相似的致灾因子和承灾体，当处于不同的孕灾环境时可能产生完全不同的非常规突发事件。对这两类情境重构时可以相当程度地保留情境描述的结果，只需补充额外的情境描述和配以各自独立的推理规则即可。

(3) 在推理引擎的选择上拥有较高的自由度, 并可以通过对推理模型和算法的选择而灵活地控制推理复杂度。目前大量的研究已经证明了有多种规则推理方法可供选择, 如贝叶斯网络 (Bayesian Networks) 推理、一阶谓词逻辑 (First Order Logics) 的方法等<sup>[108, 109]</sup>。同时, 随着对非常规突发事件应急实践的不断深入, 也会发展出更适合突发事件情境的推理方法。

#### 4.3.2 模糊情境规则建立

模糊情境规则推理方法中所采用的模糊规则可以描述为经典的“如果-则 (IF...THEN...)”的规则表示形式, 将若干个这种形式的规则进行组合, 就形成了情境库中的模糊规则集合。对于一个情景序偶, 模糊情境规则推理方法可以利用这些模糊规则来决定是否能够认为输入论域  $I$  上的前因情景与输出论域  $O$  上的结果情景具有可能的变迁关联。设论域  $U$  上的前因情景集为:  $IS = \{IS_1, IS_2, \dots, IS_m\}, m \in Z^+$ , 输出域  $V$  上的结果情景集为:  $OS = \{OS_1, OS_2, \dots, OS_n\}, n \in Z^+$ , 则通过驱动要素效用矩阵表示的变迁关系可以示意为:

$$T_{S_{m \times n}} = \begin{bmatrix} T_{S_{11}} & T_{S_{12}} & \cdots & T_{S_{1n}} \\ T_{S_{21}} & T_{S_{22}} & \cdots & T_{S_{2n}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ T_{S_{m1}} & T_{S_{m2}} & \cdots & T_{S_{mn}} \end{bmatrix} \quad (4-1)$$

$T_{S_{ij}}$  的取值为 $[-1,1]$ 区间上的模糊值,  $0 < T_{S_{ij}} \leq 1$ 表示驱动要素促进情景  $i$  向情景  $j$  变迁, 称为正向要素;  $-1 \leq T_{S_{ij}} < 0$ 表示驱动要素延缓情景  $i$  向情景  $j$  变迁, 称为负向要素;  $T_{S_{ij}} = 0$ 称为无影响要素, 属于一种特例情况。矩阵中的每个元素都代表了情景变迁的一条模糊规则, 将这些模糊规则表示为经典的“IF...THEN...”规则表示形式:

Rule[B]: IF  $x_1 = (h_1, l_1, \dots, e_1)^T$  is  $IS_1^B$  and  $x_2 = (h_2, l_2, \dots, k_n)^T$  is  $IS_2^B$  and, ..., and  $x_n = (h_n, l_n, \dots, e_n)^T$  is  $IS_n^B$ , THEN  $y$  is  $OS^B$

Fact:  $IS' \rightarrow$ Consequence:  $OS'$  (4-2)

其中,  $IS_i^B$  和  $OS^B$  均为含有模糊属性值的情景集合;  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T \in U$ ,  $y \in V$ ,  $X$  为用驱动要素效用值表示的关系,  $y$  为对结果情景的描述;  $B = 1, \dots, m \in Z^+$  表示模糊规则的数量。

采用这种形式, 可以很容易地将专家的决策经验描述成知识规则。通过对事件情境要素信息和事件过程的积累, 不断地将可获得的突发事件情境  $C$  和式 (4-2) 所示的规则进行存储, 形成突发事件的情境规则库。

对于式 (4-1) 所示的模糊规则集合, 针对某个结果情景  $OS_j$  的推理计算函数为:

$$E_j = \sum_i G(T_{S_{ij}}) \quad (4-3)$$

其中,  $G$  为作用因子的加权函数, 用来表明专家知识的偏好, 当忽略加权函数时, 可以得到

$$E_j = \sum_i T_{S_{ij}} \quad (4-4)$$

在实际的情境推理过程中, 为了提高推理时模糊规则赋值与计算的效率, 可以限定在情境描述时, 只允许情景序列中出现简单情景序偶和转换后为单个结果情景的复杂情景序偶两种情况, 即保证在每条推理规则中输出域只包含一个结果情景。对于图 2-2 中所示的另外两种复杂情境, 可以采用第 3 章中的构造方法, 将其在情景序列中分解为多个简单情境的与门和或门表示。

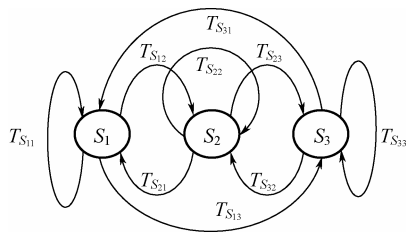
在实际的情境推理过程中, 推理系统需要采用一定的控制策略来实现

对规则的识别和匹配。这里所说的识别和匹配是指：情境规则中的每条模糊规则会被指定一个优先级，在实际推理过程中，首先在规则集中选择优先级最高的规则，当前规则的推理执行完毕后，再循环用下一条规则进行推理，直至当前情景序列不再有规则与之匹配为止，这一过程称为模糊情境规则的识别-匹配。传统的规则匹配方法通常是对规则集的全部规则逐一进行匹配，在效率上存在一定的问题。兼顾到效率与准确率，本书提出了一种反向匹配的策略方法，描述如下。

首先抽取出对当前情景来说最不可能的后续情景，过滤掉包含该后续情景的规则，从而得到全部规则的一个子集。当情境规则库规模较大时，通过这一步可以筛选出一个相对简约的规则子集。然后在该子集范围内，如果当前的情境要素状态满足规则的前提状态，则确认该条规则匹配成功。这种策略的实质是通过过滤掉包含最不可能后续情景的规则而获得一个匹配规则的范围，相当于先确定了匹配规则，所以是一种反向识别与匹配。

### 4.3.3 模糊情境规则推理示例

考虑图 4-2 所示的突发事件情境组合，其中  $S_1, S_2, S_3$  为情境中的 3 个情景节点， $T_s$  是情境作用因子集合。



◎ 图 4-2 三个情景构成的情境示意图

采用第3章的描述定义,将该情境中的情景序偶描述如下:

$$k = \{IS, OS, T_S\}$$

$IS = (S_1, S_2, S_3)$ , 表示包含三个情景的集合。

$OS = [S_1, S_2, S_3]$ , 即每个结果情景集合分别只包含一个情景。

$$T_S = \begin{bmatrix} T_{S_{11}} & T_{S_{12}} & T_{S_{13}} \\ T_{S_{21}} & T_{S_{22}} & T_{S_{23}} \\ T_{S_{31}} & T_{S_{32}} & T_{S_{33}} \end{bmatrix}, \text{ 包含 9 个情境作用因子活动的集合, 每个元}$$

素用模糊概率值  $P_{ij}$  表示作用因子的作用。当  $i = j$  时, 表示在情境作用因子  $T_{S_{ij}}$  作用下, 情景  $i$  以  $P_{ij}$  的概率维持情景不变; 当  $i \neq j$  时, 表示情景  $i$  以  $P_{ij}$  的概率在情境作用因子活动的作用下变迁到情景  $j$ 。

令  $S_0$  表示初始情景, 针对 3 个情景节点分别对初始情景进行情境推理, 过程如下。

观察系统的初始情景, 设初始情景集为单一情景  $S_1$ , 首先对情景  $S_1$  进行情境推理, 即令  $S_0 = S_1$ , 不失一般性, 设在驱动要素  $T_S$  作用下, 通过与情境规则库匹配或由专家估计得到结果情景  $[S_1, S_2, S_3]$ , 用概率表示为  $T_S = [0.02 \quad 0.12 \quad 0.86]$ , 则  $T_S$  可以看成从  $IS$  变迁到  $OS$  的一个模糊关系, 表明事件最有可能演化为结果情境  $S_3$ 。容易推理出: 若  $T_S$  概率矩阵中有元素  $T_{S_{ij}}$  大于矩阵中的其他元素, 则事件在  $T_S$  作用下, 将很可能从情景  $i$  变迁到情景  $j$ 。

将上述结果存储为一条模糊规则:

If  $S_k \in S$  and 驱动要素  $T_S$  产生正向或负向影响 and  $T_{S_{ij}}$  可获取,

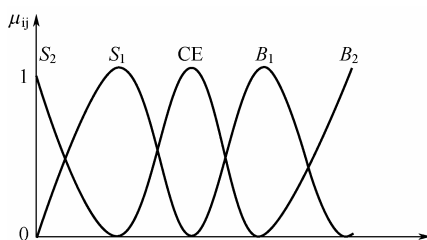
Then 情景  $S_k$  演化到情景  $S_m$  或仍保持为  $S_k$  (4-5)

这里  $T_{S_{km}}(u) = \max(T_{S_{ij}}(u))$



其中,  $S_k$  和  $S_m$  是定义在  $S=(S_1, S_2, S_3)$  上的模糊集合;  $T_{S_{km}}$  和  $T_{S_{ij}}(u)$  是定义在  $U'$  上的模糊集合, 表示驱动要素  $T_S$  发生作用后, 对突发事件发生由情景  $S_i$  (或  $S_k$ ) 变化到情景  $S_j$  (或  $S_m$ ) 这一可能性大小的估计。这里,  $T_{S_{ij}} \in U = \{\text{不可能}(N''), \text{不太可能}(N'), \text{有可能}(Y), \text{很有可能}(Y'), \text{极有可能}(Y'')\} \ i, j \in \{1, 2, 3\}$ 。

情景  $i$  演化到情景  $j$  可能性的隶属函数表述形式如图 4-3 所示。



◎ 图 4-3 情景  $i$  演化到情景  $j$  可能性的隶属函数表述形式

这样便可以将事件中的某个情景对应于情境作用因子活动下的情景演化, 用标准的模糊 If-Then 规则来描述了。更一般地可以将 (4-5) 写成如下形式:

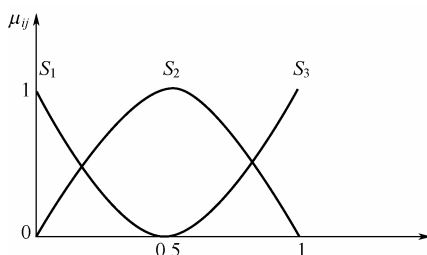
If  $S_k \in S$  and 情境作用因子  $T_S$  发生,  $\mu\alpha_{ij}(u)$  确定,

Then 情景  $S_k$  演化到情景  $S_m$  或仍保持为  $S_k$  (4-6)

这里  $\mu\alpha_{km}(u) = \max(\mu\alpha_{ij}(u))$

其中,  $S_k$  和  $S_m$  是定义在  $S=(S_1, S_2, S_3)$  上的模糊集合;  $\mu\alpha_{km}$  和  $\mu\alpha_{ij}(u)$  是定义在  $U'$  上的模糊集合, 表示作用因子  $T_S$  发生作用后, 系统由情景  $S_i$  (或  $S_k$ ) 变化到情景  $S_j$  (或  $S_m$ ) 的可能性大小的估计, 这里  $i, j, k, m \in \{1, 2, 3\}$ 。情景的模糊区间和隶属函数表述形式如图 4-4 所示。因此, 式 (4-6) 表示: 若系统在  $S_k$  情景下, 作用因子  $T_S$  发出活动 ( $T_S$  中的  $\mu\alpha_{ij}(u)$  均已确定), 那

么  $S_k$  有两种可能——由  $S_k$  演化为  $S_m$  ( $\mu\alpha_{km}(u)$  明显大于其他任意的  $\mu\alpha_{ij}(u)$ ) 或仍保持  $S_k$  情景不变 (作用因子  $T_S$  的活动对  $S_k$  不产生演化影响或影响甚微以致可以忽略)。



◎ 图4-4 情景的模糊区间和隶属函数表述形式

通过式 (4-5) 的模糊语言规则得到  $T_S$  矩阵后, 如果突发事件当前处于  $S_0$  情景, 则可通过如下的模糊推理算式得到突发事件的下一个情景  $S'$ :

$$S' = S_0 \otimes T_S = [S_1 \quad S_2 \quad S_3] \otimes \begin{bmatrix} T_{S_{11}} & T_{S_{12}} & T_{S_{13}} \\ T_{S_{21}} & T_{S_{22}} & T_{S_{23}} \\ T_{S_{31}} & T_{S_{32}} & T_{S_{33}} \end{bmatrix} =$$

$$\left[ \max \{S_1 T_{S_{11}}, S_2 T_{S_{21}}, S_3 T_{S_{31}}\}, \max \{S_1 T_{S_{12}}, S_2 T_{S_{22}}, S_3 T_{S_{32}}\}, \right.$$

$$\left. \max \{S_1 T_{S_{13}}, S_2 T_{S_{23}}, S_3 T_{S_{33}}\} \right]$$

#### 4.3.4 基于逻辑情境演算的情境重构算法

##### 1. 情境演算与非常规突发事件情境的关系

麦卡锡 (John McCarthy) 最早提出了情境演算 (Situation Calculus) 这一概念<sup>[110]</sup>, 并应用于人工智能领域, 逐渐发展成为一种用于描述动作和产生的变化的理论<sup>[111]</sup>。提出情境演算的目的是能够为情境活动提供一种逻辑建模语言, 其核心是形式化建模和一阶理论, 并且这一核心是建立在情境

概念基础上的。

基于广义系统论思想，任何一个系统情境都具有一个系统初始发生或首次被观测到的初始情景  $s_0$ ，在对情景施加一个动作或一组动作集合后，系统可以演化发展到另一个情景。由此可知，决定系统下一个情景的影响要素有两个：系统的上一个情景和对情景施加的动作。这两个因素构成了系统情境的上下文关系，基于这种关系，将系统在一种情境中的情景依赖定义为情境约束状态，将情境约束所体现的情境关联依赖特性定义为非常规突发事件的情境流。

## 2. 情境演算在情境重构推理中的设计与应用

在情境重构推理中，可以继承情境演算中的标准操作符，它们包括：合取操作符（conjunction）、析取操作符（disjunction）、等价操作符（equivalence）和包含操作符（implication），以及存在限定操作符（existential quantify）和全局限定操作符（universal quantify）。并且，面向非常规突发事件情境重构的需求，定义以下域： $T_s$ （情境作用因子活动域）、 $S$ （情景域）、 $F$ （情境关系流域）等，其中，变量以小写字母表示，常量则以大写字母表示，谓词变量定义为  $\varphi$ 。

定义二元谓词  $\text{do}(T_s, S)$ ：表示情境作用因子活动的执行使得情境中情景  $s$  发生转换后产生的结果情景。

定义情景关系  $s \prec s'$ ：表示情景在情景序列中的位置关系，当  $s$  比  $s'$  更靠近初始情景  $s_0$  时，该关系为真。

定义二元谓词  $\text{Poss}(T_s, S)$ ：为真时，表示情境作用因子活动可以在情景  $s$  下执行。

定义二元谓词  $\text{Holds}(F, S)$ ：表示处于情景  $s$  时存在情境流  $f$ ，情境流  $f$  根据不同的系统情境具有不同的含义和取值。

基于上述定义,对情境演算中的基本公理进行整理和扩展,描述如下:

$$(\forall \varphi) \cdot [\varphi(S_0) \cap (\forall S, T_s)(\varphi(S) \supset \varphi(\text{do}(T_s, S)))] \supset (\forall S)\varphi(S) \quad (4-7)$$

$$(\forall T_{S_1}, T_{S_2}, S) \cdot \text{do}(T_{S_1}, S) = \text{do}(T_{S_2}, S) \supset S_1 = S_2 \quad (4-8)$$

$$(\forall S_1, S_2, T_s) \cdot S_1 \prec \text{do}(T_s, S_2) \equiv S_1, S_2 \quad (4-9)$$

$$(\forall T_s, S_1, S_2) \cdot S_1 \prec S_2 \supset \neg S_2 \prec S_1 \quad (4-10)$$

式(4-7)定义了最小集合的事件情景域(包含初始情景 $s_0$ ),当 $s$ 属于情景集,且动作 $t_s$ 属于情境作用因子活动集合 $T_s$ 时,谓词 $\text{do}(T_s, S)$ 所表示的结果情景也属于事件情景集,该特性在一个非常规突发事件的所有情景下均成立。

式(4-8)表明:在一次具体突发事件的情境演算中,一个前因情景变换到另一个结果情景的过程一定是由唯一的一个情境作用因子活动集实现的。因为一个情景在情景序列中占据唯一的序列节点,两个情景之间的过程必然只存在一个情境作用因子活动集。

式(4-9)表明:在一次具体突发事件的情境演算中,处于同一情景序列上的任何两个不同的情景之间必然存在至少一个情境作用因子活动集可以将两者连接。

式(4-10)表明:在同一情景序列上,若由初始情景 $s_0$ 经过更少次数的情境作用因子活动到达某个情景,则该情景在情景序列中的位置更靠近序列起点 $s_0$ 。

在情境演算中,若情景关系 $s_1 \prec s_2$ 为真,当且仅当存在一个情境作用因子活动集 $T_{S_1}, T_{S_2}, \dots, T_{S_k}$ ,并且存在

$$S' = \text{do}([T_{S_1}, T_{S_2}, \dots, T_{S_k}], S) \quad (4-11)$$

即  $S' = \text{do}(T_{S_n}, \text{do}(\dots, \text{do}(T_{S_1}, S) \dots))$

该公理表明：在情境演算中，对于同一情景序列中不相邻的两个情景，总是存在由一系列情境作用因子活动集合组合而成的路径将它们连接。在对非常规突发事件的情境描述中，存在大量的情景并行关系。通过将上述扩展后的情境演算理论应用于非常规突发事件的情境重构中，可以方便地描述在一个情景中发生的自然发展和应对措施活动如何导致事件在情境内部和情境转换中演化到后续情景的过程。基于上述公理，将推理形成情景序列的算法核心描述如下：

$$Y = \Psi \cup Y_{\text{una}} \cup Y_{T_s} \cup Y_{S_0} \quad (4-12)$$

式中， $\Psi$  表示情境演算的基本公理形成的集合； $Y_{\text{una}}$  表示情境作用因子活动形成的集合； $Y_{S_0}$  为突发事件初始情景集合； $Y_{T_s}$  为情境作用因子活动后的结果情景集合，它的形式为：

$$(\forall T_s, S) \text{Poss}(T_s, S) \supset [\text{holds}(F, \text{do}(T_s, S)) \equiv \gamma^+(T_s, F, S) \vee \text{holds}(F, S) \wedge \neg \gamma^-(T_s, F, S)]$$

其中， $\gamma^+(T_s, F, S)$  声明了在  $T_s$  发生时情境流依赖  $F$  存在必要条件， $\gamma^-(T_s, F, S)$  声明了在  $T_s$  发生时情境流依赖  $F$  不再存在的条件。

## 4.4 基础设施关联的情境规则设计

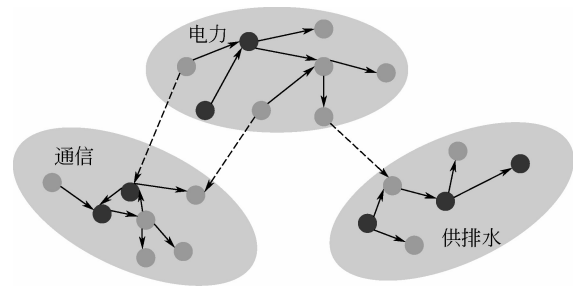
根据第3章中情境网络的设计，在状态层次上多表现为突发事件要素状态之间的关联关系。基础设施间的状态关联是这一情境网络层次上的典型表现，本节将分析基础设施关联的情境规则设计。

#### 4.4.1 基础设施网络的情境依赖描述

基础设施是一些系统和资产的总称,这些系统和资产既可以是有形的,也可以是无形的。基础设施对国家和人民生活都是至关重要的,任何损害或失效都会对社会安全、国家经济安全或民众的健康与安全产生较大的负面影响。基础设施网络中的服务提供不仅依赖于具有复杂功能的设备节点,还依赖于设施之间的连接线路。分析的难点在于设施之间日益增长的相互依赖,以及相应造成的网络失效风险的级联性放大效应下的服务损失分析。

设定  $I$  为基础设施的集合,  $I = (I_1, I_2, I_3)$ 。将每个基础设施的设备状态抽象为情景节点,以设施服务流量表示情景之间的情境关联,则第  $i$  个基础设施所构成的网络表示为  $I_i = (V^i, A^i)$ ,其中  $V^i$  表示该网络中的节点的集合,  $A^i$  表示该网络中边的集合;对于  $V^i$  中的每一个节点  $k$ ,  $q_k^i \in (-\infty, +\infty)$  表示该点的供应量或需求量,当  $q_k^i > 0$  时,该点为发点情景,记为  $V^{i+}$ ,相应地,当  $q_k^i = 0$  或  $q_k^i < 0$  时,分别表示该点为中间传送点情景和收点情景,记为  $V^{i=}$  和  $V^{i-}$ 。此外,当节点为中间传送点情景时,令其传送的容量限制为  $w_k^i$ 。对于该网络中的每条边  $\alpha$ ,  $x_\alpha^i \geq 0$  表示该条边上的流量,相应地,其运送成本和容量分别记为  $c_\alpha^i$  和  $b_\alpha^i$ 。此外,网络中的边还需要根据其所连接的节点来定义边的子集,令  $k$  表示基础设施  $I_i$  中的一个节点,即  $k \in V^i$ ,用  $\phi(k)$  表示与节点  $k$  相连的边的集合:相应地,  $\phi^+(k)$  和  $\phi^-(k)$  分别表示以节点  $k$  为入点的边的集合和以节点  $k$  为出点的边的集合。同时,对于节点  $k$ ,建立以下关联,即当  $q_k^i < 0$  时,  $\phi^-(k) = 0$  (发点情景);当  $q_k^i > 0$  时,  $\phi^+(k) = 0$  (收点情景)。令  $H_{\text{od}}^i$  表示基础设施  $i$  网内的所有收发对的集合,即情景序偶,  $h \in H_{\text{od}}^i$ ,某个收发点对  $h$  下的路径用集合用路径  $P_h = \{p\}_h$  表示,相应地,每一条路径由网络中边的子集来表示,收发点间的需求量

用  $u_h^i$  表示，路径的流量用  $f_{p,h}^i$  表示。令  $\theta_{\alpha,p}^{i,h}$  表示边和路径的包含关系，当  $\theta_{\alpha,p}^{i,h}=1$  时，表示在基础设施  $i$  中，收发对  $h$  下边  $\alpha$  包含于路径  $p$  中；当  $\theta_{\alpha,p}^{i,h}=0$  时，则反之。基础设施网络关联示意如图 4-5 所示。



© 图 4-5 基础设施网络关联示意

### 4.4.2 情境关联规则描述

基础设施网络间的情境关联规则分为两类。

#### 1. 点对点的情境依赖规则

令  $\Theta(i:l) \subseteq V^{i-}$  表示在基础设施  $i$  中，为另一基础设施  $l$  提供服务的情景节点的集合，该集合是  $i$  中发点的子集；相应地，设定  $\Omega(i:l) \subseteq V^{i+}$  为基础设施  $l$  中，接受基础设施  $i$  所提供服务的输入节点的集合，该集合是  $l$  中收点情景的子集。

关键基础设施情境依赖的数据结构如表 4-1 所示。

表 4-1 关键基础设施情境依赖的数据结构

类别	维度	分类	属性
基础设施单网情境	情景 $V^i$	供应情景 $V^{i+}$	供应量或需求量 $q_k^i > 0$

续表

类别	维度	分类	属性
基础设施单网情境	情景 $V^i$	需求情景 $V^{i-}$	$q_k^i < 0$
		中间传送情景 $V^{i=}$	$q_k^i = 0$
	关联 $A^i$	由出点和入点定义的边的全集	流 $x_\alpha^i \geq 0$ ; 成本 $c_\alpha^i$ ; 容量 $b_\alpha^i$
		与节点相连接的边 $\phi(k)$	$q_k^i < 0$ 时 $\phi^-(k) = 0$
		以节点为入点的边 $\phi^+(k)$	$q_k^i > 0$ 时 $\phi^+(k) = 0$
		以节点为出点的边 $\phi^-(k)$	$q_k^i > 0$ 时 $\phi^-(k) = 0$
	情景序偶集合 $h \in H_{od}^i$	路径 $\{P_h\}$ 由边的子集定义	需求量 $m_h^i$
多基础设施网间情境	点对点输入情境依赖规则	$A(i:l) = \{(k:g)\}$ $k \in \Theta(i:l)$ , $g \in \Omega(i:l)$	$y_{l,g}^{i,k} = 0$ 或 $y_{l,g}^{i,k} = 1$
	点对边输入情境依赖规则	$\Psi(i:l) = \{(k:a)\}$ $k \in \Theta(i:l)$ , $a \in \Gamma(i:l)$	

定义 0/1 变量  $y_{l,g}^{i,k}$  表示基础设施  $i$  中的情景节点  $k$  为基础设施  $l$  中的情景节点  $g$  提供服务的状态:

$y_{l,g}^{i,k} = 1$  表示服务被提供,  $k \in \Theta(i:l)$  ,  $g \in \Omega(i:l)$  ;

$y_{l,g}^{i,k} = 0$  表示服务中断。

其中, 接收此服务的节点既可以是发点情景, 也可以是收点或是中间传送点情景。

由于以上基础设施  $i$  与  $l$  间的输入依赖连接点对的集合  $\{(k:g)\}$  可由  $k \in \Theta(i:l)$  ,  $g \in \Omega(i:l)$  及网络间连接的拓扑结构确定, 为了简化, 进一步



定义

$$\Lambda(i:l) = \{(k:g)\}$$

在这种基础设施网间的情境依赖规则中，本书称提供服务的节点为父节点（如基础设施  $i$  中的节点  $k$ ），接受服务作为输入的节点为子节点（如基础设施  $l$  中的节点  $g$ ）。

父节点控制着另一基础设施系统中子节点的状态。

（1）父节点的状态与网间服务提供约束规则

假设：当父节点没有收到足够的服务流量时，子节点将不会得到来自父节点的服务流，即  $y_{l,g}^{i,k} = 0$ 。

根据这一假设，可得松弛变量：

$$\eta_k^i \leq (1 - y_{l,g}^{i,k})(-q_k^i), \quad \forall (k,g) \in \Lambda(i,l), \quad \forall i,l \in I, \quad i \neq l$$

当父节点的松弛变量  $\eta_k^i > 0$  时，表明父节点没有收到足够的流量，由于上式的约束关系， $y_{l,g}^{i,k}$  必等于 0。这意味着向子节点提供的服务中断了，即父子节点间的服务流被关闭了。

（2）子节点的状态约束规则

子节点的正常运转依赖于父节点服务的提供，因此子节点的状态与网间服务流的开关变量  $y_{l,g}^{i,k}$  有关：

① 子节点为发点

$$\sum_{a \in \phi^-(g)} x_a^l \leq q_g^l y_{l,g}^{i,k}, \quad \forall (k,g) \in \Lambda(i,l), \quad \text{且 } q_g^l > 0; \quad \forall i,l \in I, \quad i \neq l$$

② 子节点为中间转运点

$$\sum_{a \in \phi^+(g)} x_a^l \leq w_g^l y_{l,g}^{i,k}, \quad \forall (k,g) \in \Lambda(i,l), \quad \text{且 } q_g^l = 0; \quad \forall i,l \in I, \quad i \neq l$$

## ③ 子节点为收点

$$\sum_{a \in \phi^+(g)} x_a^l + \eta_g^l \leq -q_g^l y_{l,g}^{i,k}, \quad \forall (k,g) \in A(i,l), \text{ 且 } q_g^l = 0; \quad \forall i,l \in I, \quad i \neq l$$

## 2. 边对点的依赖情境规则

在基础设施间的输入依赖中,除了点对点的依赖外,还存在边对点的依赖。例如,供排水管线的运输能力就依赖于为其提供动力的电力。

因此,数据结构的准备同样需要构造类似于连接点对  $\{(k:g)\}$  这样的集合。令集合  $\Gamma(i:l) \in A^l$  表示基础设施  $l$  中依赖于其他基础设施的边的集合。给定基础设施  $i$  及其提供外向服务节点的集合  $\Theta(i:l) \subseteq V^{l-}$ , 可以根据网络间连接的拓扑结构确定连接的点边对集合  $\{(k:a)\}$ , 记为:

$$\Psi(i:l) = \{(k:a)\}$$

其中,  $k \in \Theta(i:l)$ ,  $a \in \Gamma(i:l)$

同时令  $y_{l,g}^{i,k}$  表示这一边对点依赖的状态,  $y_{l,g}^{i,k} = 1$  表示输入依赖正常,  $y_{l,g}^{i,k} = 0$  则表示输入依赖中断。

## 3. 边的约束规则

依赖于其他基础设施的边是否能正常工作取决于其父节点能否提供服务, 即其  $y_{l,g}^{i,k}$  的取值, 而开关变量  $y_{l,g}^{i,k}$  的取值由下式进行约束:

$$\eta_k^i \leq (1 - y_{l,g}^{i,k})(-q_k^i), \quad \forall (k,a) \in \Psi(i,l), \quad \forall i,l \in I, \quad i \neq l$$

该条边上的流量则由下式进行约束:

$$x_a^l \leq b_a^l y_{l,g}^{i,k}, \quad \forall (k,a) \in \Psi(i,l), \quad \forall i,l \in I, \quad i \neq l$$

在得到上述情境依赖和约束规则后, 存入情境库中备用。上述规则限定了情景之间的匹配关系, 当对符合我们设定的基础设施网络进行情境重构时, 只有当实时情境中的情景关系满足我们预设的情境规则和约束时,

才能说明情境重构得到的情景序列是有效的。以上过程说明情境重构模型在实际应用时，需要根据具体的突发事件类型，分析情景之间的关联关系，建立相适应的关联规则放入情境库中，并不断进行完善，才能保证在情境重构时提高情景推导的合理性，真正为后续的决策提高参考基础。

## 4.5 本章小结

---

本章研究了非常规突发事件情境重构的途径和实现方法，并重点分析了非常规突发事件情境重构方法。面向时间紧迫和信息不完全等决策约束，建立了通过关联规则推理和情境演算算法进行情境重构的方法。并以情境网络状态层次上的基础设施网络关联情境为例，分析基础设施网络依赖情境下的规则设计和约束的建立。

## 第 5 章

# 非常规突发事件情境重构 可视化方法

- 5.1 情境重构可视化的主要任务
  - 5.2 可视化模型设计
  - 5.3 可视化系统原型的部分设计与实现
  - 5.4 基于大数据的协同应急管理平台设计
  - 5.5 本章小结
-



为了让决策者快速地从全局角度了解事件情境和相关情景并建立规划积极应对非常规突发事件, 需要为情境网络描述和情境重构表达提供对应的可视化实现。将可视化技术应用在非常规突发事件的多层次情境网络和情境重构表达中, 不仅可以给决策者带来快速的情境和情景信息共享, 还可以通过快速的人机交互, 集成多决策者对情境网络和情境重构表达进行的修订和完善, 是提高情境重构效率的有效手段。非常规突发事件的数据、信息繁杂, 其多层次情境的可视化表现也是复杂的, 如何高效浏览、理解、挖掘、操作、导航大量的情境网络结构数据是可视化能否成功的关键。本章将主要研究非常规突发事件情境网络的可视化表现方法, 设计实现情境视图的布局、浏览等显示技术和模型算法。

## 5.1 情境重构可视化的主要任务

---

非常规突发事件的情境重构可视化是指利用图示化理论和计算机图像处理技术, 将情境重构的情景序列和情境网络数据转换成直观的图形视图在计算机屏幕上显示出来。通过可视化技术, 决策者可以方便地掌握事件情境网络的层次构成, 查看情景序列在情境层次上的展开过程和发展路径, 在第一时间内了解掌握事件的发生和发展态势。可视化技术加快了人机交互中对数据的处理速度, 可以最大限度地简化事件决策者观察情境重构模拟和分析过程, 并允许决策者在决策过程中进行交互控制。除了一般网络图形可视化的通用任务目标之外, 非常规突发事件情境网络的可视化还包括了一些特色任务, 主要任务目标分析如下。

### 1. 情境网络的拓扑任务目标

该类任务属于网络可视化中的通用任务，主要用来图示化展示网络的拓扑结构，重点是通过构造网络节点和节点连接，形成基本的拓扑可视化显示，并提供对拓扑结构的基本分析功能。具体包括：

#### (1) 节点邻接性（Adjacency）相关任务目标

Task1.查找一个情景节点的所有相邻情景节点的集合；

Task2.确定一个情景节点的邻接情景节点的数量；

Task3.确定哪些情景节点拥有相对较多的邻接情景节点。

#### (2) 节点连通性（Connectivity）相关任务目标

Task4.查找一个情景节点的所有可达情景节点的集合；

Task5.确定一个情景节点的所有可达情景节点的数量；

Task6.查找与特定情景节点相连通的节点集合。

### 2. 基于属性（Attribute）的可视化任务目标

#### (1) 节点（Node）属性相关的任务目标

Task7.查找具有特定情境要素和情景要素属性值的节点集合；

Task8.查看给定节点的任意要素属性。

#### (2) 连接（Connection）属性相关的任务目标

Task9.给定一个情景节点，查找通过特定关联规则与之相连接的节点；

Task10.给定一个情景节点，在所有相连接的情景节点中查找具有属性极值的节点。

### 3. 基于浏览（Browsing）的可视化任务

#### (1) 路径浏览（Path browsing）相关的任务目标

Task11.向前或向后遍历某个情景序列的全部节点；

Task12.跟踪并展示一个给定的情景序列路径。

(2) 访问记录 (Browsing history) 相关的任务目标

Task13.重新查看关注过的情景节点或情景序列。

(3) 概览 (overview) 和细节 (detail) 查看相关的任务目标

Task14.通过集中查看网络的缩略和高层视图快速获得情境网络的一些概要性信息，如查看事件链层次的情境网络；

Task15.在选定网络的某个局部概览后，可以详细查看该部分的细节视图（包括局部的情景节点和情景序列）。

## 5.2 可视化模型设计

---

### 5.2.1 图元设计

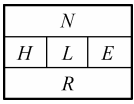
#### 1. 情景图元表示

用一个方形框表示一个情景，框中注明该情景的编号。用一个五元组具体表示一个情景，包含  $N$ （事件链）， $H$ （致灾因子）， $K$ （承灾体）， $E$ （孕灾环境）， $R$ （致灾因子、环境、承灾体三个要素对当前事件情景的模糊关系）五个部分，如图 5-1 所示。

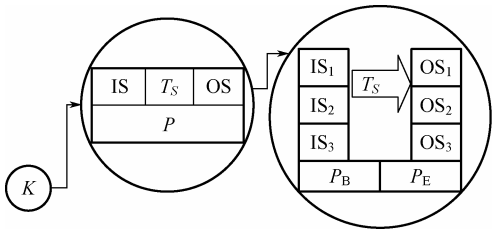
#### 2. 情景序偶的图元表示

用一个圆圈图标  $C$  表示一个情景序偶，圆圈中注明该情景序偶的编号。用一个四元组具体描述一个情境，包含  $IS$ （前因情景集）， $OS$ （结果情景）， $T_S$ （作用因子）， $P$ （转换概率，包含先验概率和后验概率）四部分内容，如图 5-2 所示。





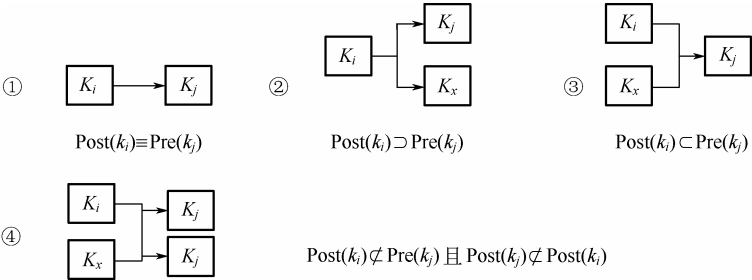
◎ 图 5-1 情景图元



◎ 图 5-2 情景序偶图元

3. 情景序偶关联关系的图元表示

用有向弧表示情境之间的联系，箭头方向表示情景序偶之间的关联关系。由定义 3-3 可知，情景序偶之间的关系分为四种情况，其对应的四种图元表示如图 5-3 所示。

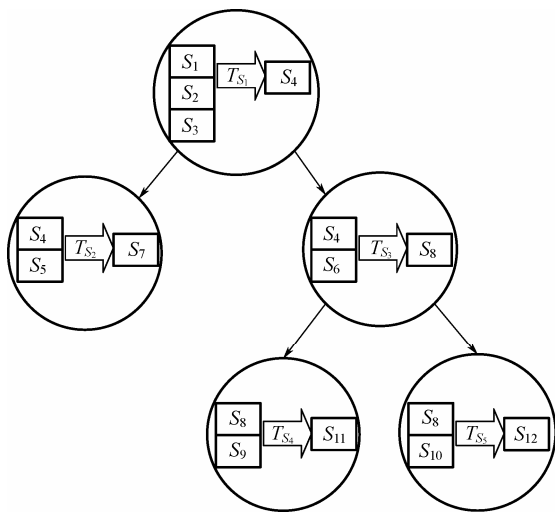


◎ 图 5-3 情景序偶关联的图元表示

5.2.2 情景序列的可视化

一次突发事件的重构过程主要是通过设计要素和属性建立情景，并按照情景之间的因果关联联系构造情景序偶展开，从而呈现出情景之间的顺序、关联及作用因子活动对情境演化发展的影响，其实质是利用情景和情景序偶的可视化，按照不同的情境层次逐级展开形成完整的情景序列描述，这样可以重构出事件发展的可能分支。图 5-4 所示为在一个情境层次中包

含 5 个情景序偶和 12 个情景的情景序列可视化展开形式，可能经过的活动因子活动为 $T_{S_1}$ ， $T_{S_2}$ ， $T_{S_3}$ ， $T_{S_4}$ ， $T_{S_5}$ ，可能的终结情景为 $S_7$ ， $S_{11}$ 和 $S_{12}$ 。



◎ 图 5-4 情景序列可视化展开示意

5.2.3 多层次情境网络的拓扑可视化实现

情境网络的拓扑结构包括了情境的层次、情景节点的分布和节点之间的关联关系，反映到可视化图形上即表现为图形节点和节点之间的连线。因此，情境重构的可视化必须把情境网络的这两个特征以直观的方式在计算机上都显示出来。在可视化显示上，以圆形的图元节点来表示情景序偶，以节点间的有向连线来表示情景之间的连接关系，以一定的排列规则进行显示。由于非常规突发事件的情境网络节点众多，属于大型可视化网络，不可避免地含有大型网络可视化通常要面对的效率问题：排列复杂且经常发生变化、大数据量造成视图展开或收缩的速度较慢等。要使情境重构可

可视化效果清晰、易观察，在短时间内辅助决策者了解突发事件状况，必须提升节点表示和节点显示排列的效率。本书在情境网络的形式化描述设计过程中已经考虑到了这一效率问题，将情境网络按照所关注情境的粒度划分为三个层次（事件链层、状态层、因子层）。在进行可视化显示时，并不要求一次性显示包含全部节点的情境网络，而是可以为决策者只展开更关注的某一次层次网络，然后根据用户的选择反馈在不同层次的网络间进行浏览和切换，每次只载入所需部分的节点数据并进行排列显示，为大数据量的情境网络提供了一定程度的数据负载缓冲。在构建可视化模型时，基于情境网络的三层结构，将情境网络的拓扑结构对应于形式化模型的层次化设计。第一个层次为非常规突发事件的事件链情境层；第二个层次为非常规突发事件的状态情境层；第三个层次为非常规突发事件的影响因子情境层。在显示时，如果系统记录中没有当前决策用户对可视化显示的偏好信息（例如，对于首次使用情境重构可视化的用户），可以首先显示事件链情境层次的情境拓扑关系作为显示主视图，而不显示低层次的状态情境和影响因子情境网络，便于从宏观上把握事件链的破坏态势；当需要显示查看细化的低层情境时，可以根据用户的选择，在另外打开的可视化窗口中逐层展开显示事件的状态情境和影响因素情境作为显示辅视图，通过在不同视图之间的切换浏览实现主辅视图的联动。实现这种设计思路需要解决好两个问题：一是情境网络节点的拓扑关系存储表示，二是情境网络节点的拓扑关系排列显示。前者需要提供对大规模情境网络节点和关系数据的结构化存储方式和表示方法；后者需要提供对大量节点进行排列和布局的有效算法。

### 1. 拓扑表示和数据结构

根据本书在第3章所设计的三层情境网络，选择以多叉树图形形式作为情境重构可视化的显示方式。即与各情景节点产生相连关系的节点要么

是其上层的父节点 (Parent)，要么是其下层的子节点 (Children)，保证了连接中不会产生相互交叉线。在存储方式的设计上，一般的可视化网络通常采用邻接表或矩阵、链表等多种数据结构来进行存储，本书选择的存储方式是一种与邻接表相类似的存储结构。存储结构中的两种数据结构分别为网络节点和网络边。网络节点表示了所有需要被存储并进行显示的情景节点，包括在事件情境层、状态情境层和因素情境层中的所有节点；网络边表示了情景之间存在的连接关系。所有与当前节点相连的情景节点构成了当前节点的 Children 子域，即对应着节点间的连边。如果用一个数组来存储这些节点，就可以构建出整个情境网络的拓扑关系。情境网络的拓扑关系确定后，就需要决定每个情景节点图元在可视化显示时应处的显示位置。采用的方法如下：以用户指定的事件的初始情景开始，确认对应的情景节点，构造寻找关联的结果情景节点组成一对情景序偶，作为第一级节点；与其相连的情景作为第二级节点，从第二级的情景再向下展开，与其相连的情景节点作为第三级，依次类推，一直进行上述方法直到不再发现有相连的情景序偶。当得到整个情境网络的拓扑关系时，也同时确定了每个情景在网络中所处的结构层次。

如前所述，在分层情境网络可视化方法中，主要的两个数据结构是情景节点和连边。在节点的数据结构中设计了四个数据域：分别是 Children 子域、Parent 父域、Level 域和 Position 域。

(1) Children 子域：是一个链表结构，表示与当前情景节点相连的其他情景节点，当前情景节点与其 Children 子域中的节点构成了连边。

(2) Parent 父域：表示每一个情景节点的父节点。确定父节点的方法为：设初始情景节点为  $S_0$ ，从  $S_0$  出发，若与之相连的情景节点为  $S_1$  和  $S_2$ ，则  $S_0$  为  $S_1$  和  $S_2$  的父节点；从  $S_1$  出发，若与之相连的情景节点为  $S_3$  和  $S_4$ ，

则  $S_1$  为  $S_3$  和  $S_4$  的父节点，依次类推。

(3) **Level 层域**：表示每个情景节点所处的情境层次。

(4) **Position 域**：表示每个情景节点的显示位置（坐标值  $x$  和  $y$ ）。

在连边的数据结构中，为避免数据上的冗余，只存储边连接的两个相连情景节点的序号，对应节点的其他属性并不在此处保存。当需要通过连边查看对应节点的属性时，可通过与节点数据结构进行关联查询获取。

情景节点的数据结构表述如下：

```
class ScenarioNode {  
    String scenarioNodeName;  
    String scenario[ScenarioNum];  
    int scenarioNodeNum;  
    SenarioList Children;  
    ScenarioNode Parent;  
    Display vexNodeIcon;  
    int level;  
    int type;  
    int index;  
    Point Postition;  
    boolean isVisited;  
}
```

连边的数据结构表述如下：

```
class ScenarioLine {  
    int adjacentNode;  
    ScenarioNode beginNode;
```

```
ScenarioNode endNode;  
  
int distance;  
  
String description;  
  
}
```

除了情景节点和连边这两个主要的数据结构外，还需要另外设计三个辅助性的数据结构：**Scenario** 用来定义从情境库中读入的情景数据，所有的情景数据保存在 **ScenarioList** 链表中；**Relation** 用来定义从作用因子表中读入的作用因子活动数据，所有的作用因子活动数据保存在 **RelationList** 链表中；**Probability** 用来定义从概率属性表中读入的概率数据，所有的概率数据保存在 **ProbabilityList** 链表中。

这三个数据结构分别表示如下：

```
class Scenario{  
    String ScenarioName;  
    int level  
    int scenarioNumber;  
    ScenarioList scenario[scenarioNumber];  
    boolean isVisited;  
}  
  
class Relation {  
    String contextName;  
    int relationNumber;  
    Scenario inputScenario;  
    Scenario outputScenario;  
    String scenario[scenarioNumber];  
}
```

```
        boolean isVisited;  
    }  
    class Probability {  
        ScenarioNode beginNode;  
        ScenarioNode endNode;  
        int scenarioIndex;  
        float probability;  
        boolean isVisited;  
    }  
}
```

情境重构可视化的过程描述如下：

STEP1 读入情境、关联数据，存入节点链表、链接链表中。

STEP2 取出系统定义的第一层情境节点。

STEP3 从第一层节点出发，遍历链接链表找到与之相连的其他节点。

STEP4 循环 STEP3，直到找不到新的连接节点，生成事件的整体情境网络拓扑图为止。

STEP5 根据用户的鼠标点击，隐藏或显示底层的情境网络。

## 2. 节点的布局算法

节点布局是情境网络绘图时的重要步骤，布局算法要解决如何确定节点图元的大小和节点的位置两个问题。

(1) 确定每个节点的大小。在布局时，将每个情景序偶节点都用圆形图元表示，图元的大小（圆的直径）与情景序偶内包含的情景数量成正比。因此，用户可以直观地从图元的大小比较出情景序偶的粒度规模。

(2) 确定每个节点的位置。由于情境网络的多层次性和每个层次的节点数量较多，在有限的应对时间条件下，首先排除掉高时间复杂度的布局

算法。因此，本书选定简单的层次分布式布局。因为层次分布式布局在节点位置计算时较为简单，且对规模不一的节点展示较为清晰，非常适合于非常规突发事件应急的紧迫性需求。节点位置的计算方法描述如下：

```
//得到每一层中的顶点总数
GetNumber (scenarioNodes, numOfLevel[level]);
//取出最顶层的根节点
GetRoot (scenarioNodes[root]);
//计算根节点位置的横轴坐标
scenarioNodes[root].Position.x = getPositionX ( root );
//计算根节点位置的纵轴坐标
scenarioNodes[root].TopLeft.y = getPostionY ( root );
//设置该节点为已访问过
visited (scenarioNodes[root]) = true;
While (scenarioNodes.hasNext ()) {
    //循环取出 scenarioNodes 队列中的下一个节点
    {scenarioNode = scenarioNodes.next ();
    If (scenarioNode.Children.hasNext ()) {
        //取出 Children 子域中的节点
        {scenarioChildNode = scenarioNode.Children.next ();
        //计算该节点显示位置的横轴坐标
        ScenarioNodes[scenarioChildNode].Position.x=getPostionX
( NumOfShow[ScenarioNodes [scenarioChildNode] . Level] , levelWidth ( ScenarioNodes
[scenarioChildNode] .Level) );
        //计算该顶点显示位置的纵轴坐标
        ScenarioNodes[scenarioChildNode].Position.y=
```



```

getPostionY (scenarioChildNode.Level) ;

//该情境层次显示的情景节点数增加一个
NumOfShow[ScenarioNodes[scenarioChildNode].Level]+= 1 ;

}

FOR (ns in scenarioNode.Children) {

//遍历所有访问过的 Children 子节点，将每个节点设置为已访问过

visited[ns] = true ;

}

}

```

其中，

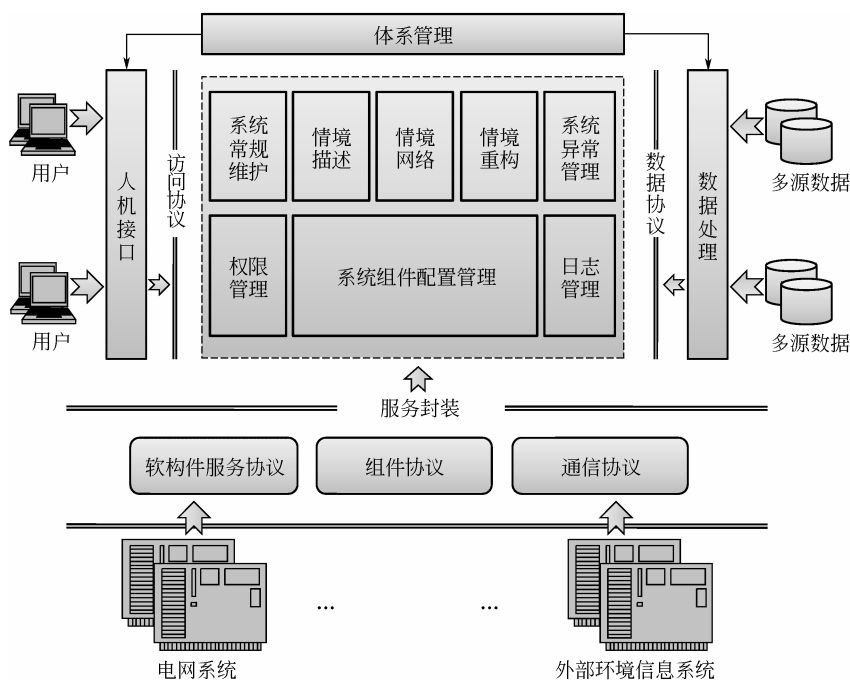
```

totalLevel: 表示事件情境的总层数；
numOfLevel[level]: 表示一个情境层次中的节点总数；
NumOfShow[level]: 表示每层已显示的顶点数；
levelWidth[level] : 表示每层显示区域的最大宽度；
visited[level]: 表示是否访问过的访问标志；
senarioNodes: 表示需要显示的情景节点队列。

```

## 5.3 可视化系统原型的部分设计与实现

由于非常规突发事件的发生、发展和应对都与地理信息紧密相关，模拟系统就需要和 GIS 紧密集成才能充分反映事件的发展变化，因此系统采用面向 GIS 服务的接口设计，系统设计结构如图 5-5 所示。



◎ 图 5-5 系统设计结构

5.3.1 系统的分类情境功能设计

1. 台风情境

根据台风信息，结合 GIS 在信息直观展示方面的优势，在地形图上直观地显示实际台风路径和预测的台风路径。在台风路径节点上可以显示台风气压和风向、风速和风力，以及主要级别台风的风圈半径（如 7 级台风和 10 级台风）等详细信息。将风力等级作为台风路径节点的主要属性，根据风力等级与图形颜色的对应表（见表 5-1），以不同颜色对台风路径节点进行直观显示。

表 5-1 风力等级与图形颜色对应表

风力等级	显示颜色
12 级以上	红色
10 级至 11 级	黄色
8 级至 9 级	绿色
7 级	蓝色
7 级以下	黑色

2. 雷电情境

雷电情境是电网灾害破坏中较为常见的一种情境，对该情境的认识与分析，有助于更好地对电网灾害进行应急。该情境模块需要提供雷电信息和雷电对电网破坏的信息及分析，功能上包括信息显示与信息分析两个部分。

（1）雷电情境信息显示

雷电信息与地图的集成显示主要用来将雷击的发生时间、位置、雷电流幅值、回击次数等信息在地图上能直观地显示出来。通过 GIS 自带的图形放大、收缩、导航漫游等功能，决策者可以直观地对雷电信息进行查看和查询，包括按时间及特定路线等查询方式来查询、统计并显示雷电信息。

（2）雷电情境信息分析

通过提供按时间跨度的雷电强度、次数的分析和雷电路径上电力设备破坏情况的分析，建立雷电情境与电网破坏的关联分析基础。

3. 洪涝情境

洪涝情境信息包括降雨引发的洪水信息和降水过多造成的积水灾害信息。该情境信息模块需要提供的信息包括降雨量、土壤地质、蓄水量、水利工程信息（水库的水位、库容及进库、泄出流量的实时数据）等。在与

GIS 集成后，可以按地理区域显示洪涝相关信息，提供按时间、按特定条件对上述信息进行查询。

#### 4. 火灾情境

火灾情境信息包括火灾发生地点、火势、烟火高度、蔓延方向等信息。其中火灾发生地点可以通过现场的定位装置或现场应急人员的手持定位设备获取得到，并在 GIS 地图上进行定位显示。将地图上的火情点进行连接，就可以为应急决策者提供火势发展路径的信息显示。

#### 5. 冰雪情境

冰雪情境在 2008 年我国南方雪灾中表现得最为明显。在应急系统中需要关注降雪量、低温、持续时间、覆冰厚度等信息。

#### 6. 地震情境

以图形显示电网相关区域的地质、地形、山体、滑坡、地震带分布等情境信息。

#### 7. 基础设施情境

以图形显示电网供排水、燃气、交通等基础设施建设的节点、线路分布等情境信息。

### 5.3.2 预案管理

基于事件情境的分析，可以适时地启动相关预案，为应急管理争取主动。预案管理包含以下三个部分。

#### 1. 预案列表与查询

列表显示系统提供的各种预案，包含洪涝、雷电、电网中断等主要应急预案，并支持用户按照时间、预案分类、关键字等方式对预案进行查询。用户可以对选中的预案进行详细查询或下载预案文件。

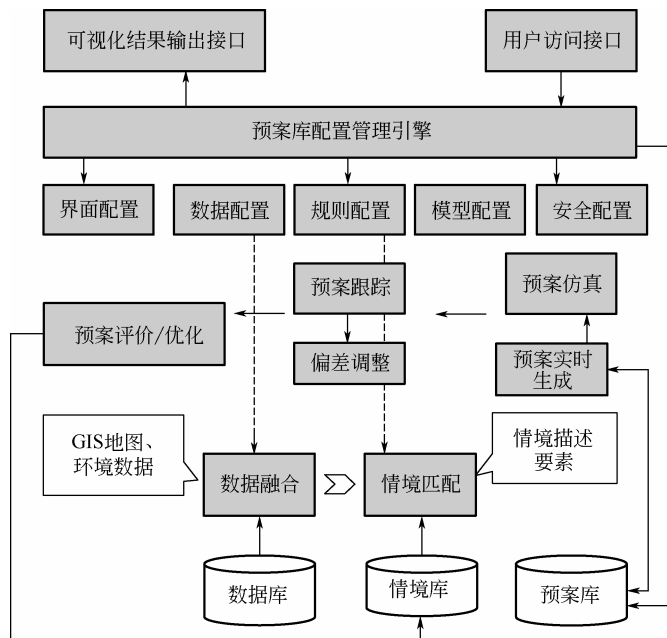
### 2. 预案启动与追踪管理

用户确定某项预案后，可以启动该预案。预案启动后，根据用户反馈系统可以按顺序汇总显示预案各步骤耗用的时间，并显示用户添加的执行记录和备注。采用图形化形式显示预案的跟踪与反馈。可以对比同类事件中各相关预案的执行时间、过程等信息，为预案的反馈修订提供基础。

### 3. 预案实时生成

针对预案失效的状况，系统提供预案实时生成功能。该功能支持用户根据情境描述，从预案库中选择相关预案，并从各预案中选择适合的步骤重新生成新的预案。

预案模块设计结构如图 5-6 所示。

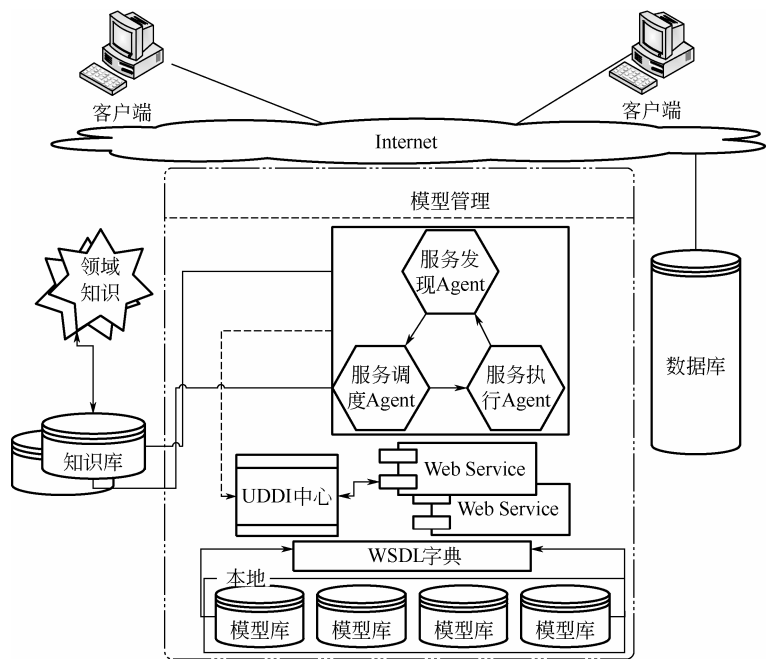


◎ 图 5-6 预案模块设计结构

### 5.3.3 情境重构模型的分布式管理设计

情境规则配以不同的推理引擎可以形成多种情境重构模型，并存储在模拟系统中。在非常规突发事件的分布式应急决策环境下，这些重构模型是异地异构的，为便于集成，系统基于 Web 服务和 MAS 的重构模型管理方案。该方案的目标是建立 Web 服务形式的、开放性的跨平台集成重构模型库，即以 Web 服务来实现和统一管理异地、异构的重构模型，利用 Agent 技术的特性支持在决策过程中模型的发现、组合和动态调用，并提供相关的应用服务支持。在 Web 服务体系中，使用 Web 服务描述语言（Web Service Description Language, WSDL）来描述服务，用统一描述、发现和集成协议（Universal Description Discovery and Integration, UDDI）来发布、查找服务，用简单对象访问协议（Simple Object Access Protocol, SOAP）来执行服务调用。其中，WSDL 是用于描述 Web 服务的规范，它使用 XML 语法定义了用于描述 Web 服务各个方面的元素，包括 Web 服务的位置，包含的接口、接口中的方法和方法的参数类型等。UDDI 为发现 Web 服务定义了一系列的机制。UDDI 注册中心是 UDDI 规范的实现，通过它可以发布服务和查询服务。基于 Web 服务和 MAS 的分布式重构模型管理的核心思想是：把分布在不同网络节点上的模型视为独立的对象，以 Web 服务形式来形成统一的接口实现，集成管理形成一个虚拟的中央模型库，供分布在各地的应急决策系统进行选择、组装和调用。

分布式情境重构模型管理的重点是建立通用化的模型表示、发现及调用管理，关键环节是要建立将异构模型转化为标准 Web 服务模型的机制，即通过 WSDL 构建模型字典、基于 UDDI 进行统一管理及利用 MAS 的技术特性进行发现与调用的模型管理系统。重构模型管理体系设计如图 5-7 所示。



© 图 5-7 重构模型管理体系设计

### 1. 基于 Web 服务的重构模型转换机制

不同组织建立的重构模型在形式上很难保持一致，需要提供方法将这些模型转换为标准的 Web 服务模型。为便于转换，需要使局部模型能更科学地描述客观抽象，为此将模型分为两类：单一模型和复合模型。单一模型是不能再细分的模型，完成单一的情境重构功能；复合模型由多个单一模型及单一模型群组成，完成复杂的情境重构功能。参考面向对象表示法，提出如下基于 Web 服务的模型表示法：一个模型将被表示为一组包含属性和 Web 服务方法的接口和类，并具有一般对象的继承和聚集关系。具体含义如下：

(1) 所有的模型都是 Web 服务形式的，即模型和 Web 服务一一对应。

(2) 每个模型都包含输入、输出接口和一系列的 Web 服务方法，通过接口之间的对应和对 Web 服务方法的调用完成模型的组合、运行等操作。

(3) 模型与外部环境之间的对话接口全部封装成 Web 服务方法。

(4) 所有的模型都是自描述的，接口和功能都用 WSDL 进行详细说明。因此，一个模型至少包括以下三个部分。

(1) 输入、输出接口：描述模型的输入、输出变量的名称和类型。输入、输出可以是简单的数据类型，也可能是复杂的结构。

(2) Web 服务方法：是模型功能的体现，对于单一模型和复合模型而言，其表示有所不同。单一模型直接通过 Web 服务方法处理输入参数，完成参数输出，可以当成一个 Web 服务来完成；而复合模型的 Web 服务方法需要分解输入参数，根据 WSDL 字典建立多个单一模型的运行链，依次调用后完成参数输出。

(3) WSDL 描述字典：对每一个方法都用 WSDL 对其接口和功能进行详细说明。

对各应急决策组织本地的重构模型进行转换与集成的过程可以描述如下：

(1) 分析各组织的本地模型，确定模型属于单一模型还是复合模型，如果是复合模型，则将模型继续分解成为多个单一模型。

(2) 对于各单一模型，抽取模型的输入与输出部分，封装成接口。将模型的实现封装成 Web 服务方法。

(3) 建立 WSDL 字典，对于单一模型，可以在 WSDL 中列出输入、输出接口的规格和 Web 服务描述；对于复合模型，除完成上述描述外，还



需要在 WSDL 中描述运行该复合模型所需的多个单一模型的运行顺序和关系。

## 2. 模型的选择与调度

如图 5-7 所示, 采用 Agent 技术封装 Web 服务中的三个主要元素, 模型的选择与调度利用 Agent 在 UDDI 的基础上完成。根据功能的不同, 将 Agent 分成以下三类。

**服务发现 Agent:** 该类 Agent 根据问题描述查询知识库, 到 UDDI 中寻找恰当的 Web 服务。

**服务调度 Agent:** 该类 Agent 负责对查询得到符合条件的 Web 服务进行优化选择, 形成调度方案。

**服务执行 Agent:** 该类 Agent 负责调用 Web 服务, 传递服务运行结果。

上述 Agent 之间合作进行模型选择与调度。它们之间的协作关系及过程描述如下:

(1) 在接收到模型调用请求后, 服务发现 Agent 将依据 WSDL 中对模型功能的描述进行搜索, 根据模型接口之间的对应关系组合成模型调用方案。为提升效率, 必须将服务发现 Agent 设计成能够迅速发现一个合适的方案而无须采用非常耗时的完全从头搜索方案。因此, 可以考虑基于事例的方法, 对 Web 服务成功调用的经验将作为事例被存储, 每个事例都包含一组事例特征和结果。

(2) 服务调度 Agent 从服务发现 Agent 接收一个推荐的调度方案并对该方案匹配度和方案中模型可执行性进行判断。其中对模型可行性的判定主要考虑模型是否具备了执行条件, 如对某个模型的调用执行需要以其他模型的执行完成为基础, 若其他模型尚未得到执行, 则该调度方案中对该模型的当前调用是不可以执行的。如果方案中的所有模型的可执行性判定

均通过且对匹配度足够满意,则将调度计划传递到服务执行 Agent; 否则, 服务调度 Agent 在注册中通过查询得到合适服务模型从而构建一个适当的方案, 通常 UDDI 是主流的网络服务目录。如果一个网络服务加入, 首先要将自己发布到注册表中。这里给出服务调度 Agent 进行模型是否可执行的判断算法:

设模型空间中共包括  $n$  个单一模型和复合模型, 表示为  $M=\{m_1, m_2, \dots, m_n\}$ , 任意两个模型之间关系表示  $C(m_x, m_y)$ :

$$\begin{cases} C=0 & m_x \text{ 的运行不受 } m_y \text{ 的影响} \\ C=1 & m_x \text{ 的运行以 } m_y \text{ 的运行作为前提} \end{cases}$$

通过下列步骤判断模型  $m_x$  ( $1 \leq x \leq n$ ) 与其他  $n-1$  个模型的关联:

STEP1 初始化, 令  $x=1$ 。

STEP2 令  $y=1$ , 标记模型  $m_x$  的状态为 pass。

STEP3 令  $y=y+1$ , 判断若  $y=x$ , 则  $y=y+1$ 。

STEP4 判断若  $y > n$ , 则转 STEP5; 否则判断: 若  $C(m_x, m_y)=1$ , 在模型调度方案中查找模型在方案调度中的运行序列状态, 若模型  $m_y$  排序在  $m_x$  之前, 则转 STEP2; 否则将  $m_x$  的状态设为 notPass 并转到 STEP3;  $C(m_x, m_y)=0$ , 则转到 STEP3。

STEP5 若  $x \leq n$ , 则  $x=x+1$ , 并返回到 STEP2; 否则, 转到 STEP6。

STEP6 若  $\forall m_x \in M$  的状态均是 pass, 则该调度方案可行; 否则该方案不可行。

(3) 服务执行 Agent 根据可行的调度方案直接执行网络服务并将解决结果传递给客户端。这种自动化的网络服务执行是提供无缝服务的关键。服务执行 Agent 的工作流程是:

- ① 从服务调度 Agent 处接收方案;
- ② 根据计划方案查询发现网络服务;
- ③ 接收输出参数然后传送给下一个网络服务作为输入;
- ④ 传送输出结果给用户。

### 3. 重构模型管理的系统实现

以 Java 语言设计的两类情境重构模型的接口描述如下。

#### (1) 复合决策模型

```
public class CompoundModel {    //复合模型类

    public CompoundModel {

        initialization();        //模型初始化方法

    }

    public OutParaClass run(inParaClass inPara){

        //实现多个单一模型的链接过程

        OutParaClass  outPara= AtomModel1.run(

            AtomModel2.run(

                AtomModel3.run(InParaClass inPara1)// 复合模型所需的 n 个单一模
型组成。先调用的单一模型的输出成为后调用单一模型的输入，即形成多个单一模型
的链接调用

            )

        );

        return outPara;

    }
}
```

## (2) 单一重构模型

```

public class AtomModel
{
    public AtomModel(){
        Init();    //模型初始化
    }

    public OutParaClass run (InParaClass inPara)
    { //模型的运行，产生输出参数    }
}

```

模型服务的描述信息是通过 WSDL 来描述的。在 Apache SOAP 中通过一个叫做配置描述符 (Deployment Descriptors, DD) 来描述 SOAP 服务的配置信息。下面是一个普通 Java 类所提供的 SOAP 服务的例子，其 DD 文件为：

```

<isd:service xmlns:isd="http://xml.apache.org/xml-soap/deployment"
    id="urn:service-urn">
    <isd:provider type="java" scope="Request|Session|Application"
methods="exposed-methods">
<isd:java class="implementing-class"[static="ture|false"]/>
</isd:provider>
    <isd:faultListener>org.apache.soap.server.DOMFaultListener</isd:faultListener>
</isd:service>

```

其中 id 为 SOAP 服务的 ID，在同一个 SOAP 服务上，这是一个唯一的值；scope: 为规定的服务实例的生命期；methods: 为 SOAP 服务中可以

调用的方法名列表；`class:Java` 类的完整路径，并指明调用方法是静态方法还是实例方法。

## 5.4 基于大数据的协同应急管理平台设计

---

近年来，各种突发事件和灾害引发的广泛的服务中断带来了一系列社会安全和保障问题。公众在经历毁灭性的灾难时和经历灾难后，越来越期望更好的、有更多应急管理（EM）系统支持的公共事务管理能力。灾难中涉及的大量的公众成员、非营利组织、私人机构、媒体、公民和社区都需要有广泛的能在纵向和横向进行协调的能力。这使得 EM 的决策过程更为复杂，错误的决定将产生更为严峻和昂贵的后果。特别是，随着智能移动设备和应用的快速增长，成分混杂的社会媒体的大数据（数据来自各种渠道，包括传感器、卫星、社交媒体供稿、照片、视频和手机的 GPS 信号）正变得越来越重要和有价值。社交媒体和大数据将对 EM 服务的过程和效果产生重大影响。因此，有必要发展基于大数据的支持灵活规划、应急事件检测和快速响应的 EM 平台。这些系统的发展应包括一个新的结构和过程，并基于一些关键的信息技术，如数据采集和存储、语义分析和情感建模的大数据和使用大数据进行事件检测。这些技术将使应急管理平台充分、高效和有效地运作。

在紧急情况下，突发事件是指那些能伤害或导致大量人死亡，破坏财产，毁坏社会生活的极端事件。传统的应急管理系统是由政府计划的，这意味着它在假定通信不间断的情况下严重依赖于相对严格的计划、确切的决策协议和正式的关系。在这样一个传统的应急管理系统中，一个典

型的过程更可能涉及以下几个阶段：规划、缓解、准备、响应和恢复，如图 5-8（a）所示。这样的情况下，有效性依赖于日常的注意防备、应对日常压力和灾难的敏捷性和促进快速恢复的韧性。我们可以找一些专注于应急管理的系统设计和典型流程且已经实现的工作，如规划、响应等。这项工作促进了传统 EM 理论和实践。然而，传统的 EM 总是专注于部门和组织的官方数据，很少强调社交媒体中的个人数据。显然，社交媒体可以提高危机情境感知，而危机情境感知可以简化以下几个方面的工作：

（1）准备和事件检测。与传统的 EM 被动准备相比，社交媒体可以促进信息共享，通过在突发事件发生或发生之前，监测和检测突发事件以使应急准备更灵活有效。

（2）响应。通过大数据进行应急响应时，应急的有效性依赖于归档信息的可用性和实时位置感知信息的可用性，以及有效地整合和利用不同的自治机构信息的能力，这些对制定有效决策和应对危机的资源部署至关重要。

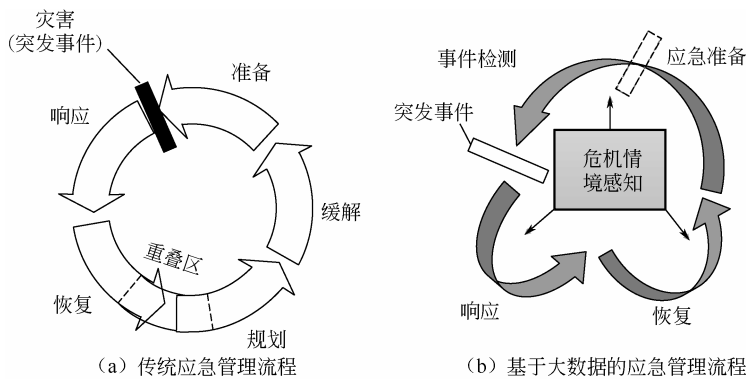
（3）恢复。在恢复中，大数据可以帮助安排救援人员、路线和救灾物资，减少危机后的损失<sup>[12]</sup>。此外，通过处理大规模个性化数据和跟踪个性化危机相关需求，EM 可以获得更有针对性的援助和服务。

因此，本书的研究目的是促进社交媒体来增强 EM 提出的一个系统构架。它提供了在协同 EM 平台上使用大数据诊断、监督和预测的结构和过程，关键技术和方法的定义。它与现有系统的不同之处在于以下几个方面：

（1）数据来源从 Office 数据扩展到社交媒体数据。

（2）利用大数据，将过程简化为 3 个阶段，如图 5-8（b）所示。

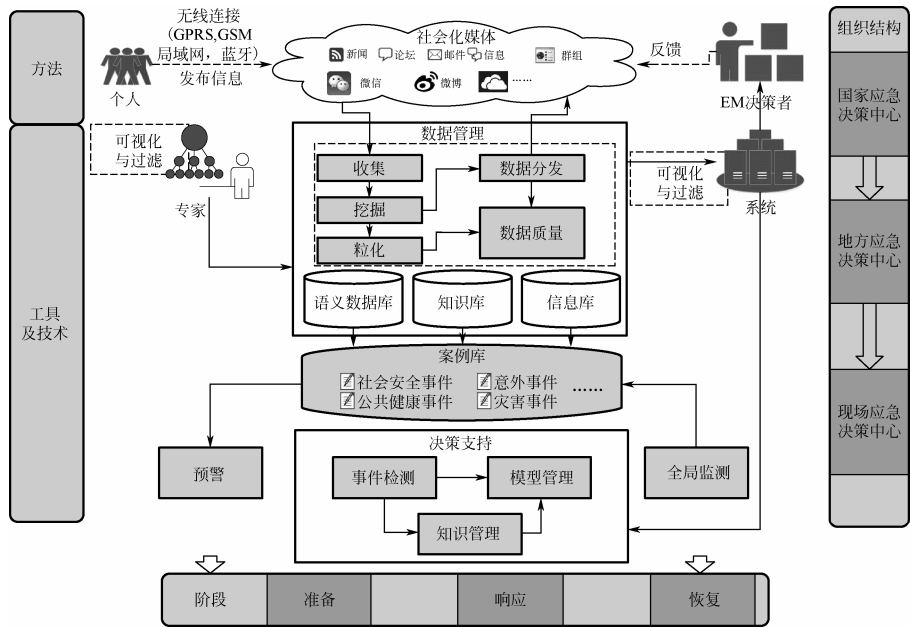
（3）使用社交媒体数据，它支持更多的利益相关者——公共组织，非营利和私人组织，公民和社区。



◎ 图 5-8 应急管理系统中的阶段

### 5.4.1 系统体系结构设计

协同应急管理系统的体系结构如图 5-9 所示。



◎ 图 5-9 协同应急管理系统的体系结构

该系统包括以适当的信息基础设施、互操作系统及其相互通信来应对紧急事件的主题和服务。

国家应急中心、地方应急中心和现场决策中心都可以找到应对突发事件的对象。建立高效、统一的应急联动机制已成为应急决策管理的重点，特别是要建立和完善部门间的有效沟通与合作机制，实现资源共享与整合。中国已经制定了 60 多个法律法规应对自然灾害、事故、突发公共卫生事件和社会安全事件。一些省份也出台了地方性法规和规章。多层次的法规标志着我国规范应对各类突发事件共同行为的基本法律制度也已确立，它为有效实施应急决策管理提供了更加完备的法律依据和法制保障。

互操作系统是该模型的基本模块，它用透明的方法来收集不同来源的数据。一般来说，互操作性是指两个系统间交换信息的能力。在应急管理的过程中，这种能力是非常重要的，所有应对突发事件的模块拥有自己的信息系统，并且在一个模块内访问其他模块的数据以寻求高效的质量决策是必要的。然而，它会在系统中产生大量的信息。为了解决这个问题，必须建立足够的信息和通信基础设施，运用有效的存储、访问、检索和正确使用大量知识和信息也是必要的。

## 5.4.2 关键技术讨论

### 1. 情景分析技术

情景分析技术用于构建协同应急管理的情景数据库，识别和确定影响未来平台需求和能力水平的重要驱动因素。通过分析和定性描述的因素，我们可以识别和区分每个场景所代表的发展方向。在协同 EM 平台中，情景分析的过程主要包括以下 4 个步骤，以地震灾害为例：



(1) 发现应急系统的基本运行机制, 建立相应的地震结构, 包括常见的阶段和救援计划。这可以由当地或国家响应决策中心处理。

(2) 一方面, 当前地震形势的趋势是由图 5-9 中的数据管理进行分析的, 由此可以推断总体发展情况; 另一方面, 通过现状分析, 进一步探讨对地震响应造成巨大影响(时间、人口、地形、交通等)的不确定性因素和关键因素, 其处理方法可通过图 5-9 所示的案例确定。

(3) 通过以上两方面的工作, 建立了下一个场景配置的基础。然后, 考虑因素之间的因果关系, 确定几个典型的系统开发路径, 并强调相应的方案; 同时, 应分析和确定可能会影响每个场景概率的因素的相互关系。

(4) 在第三步情景设置的基础上, 针对不确定因素影响较大的环节, 研究其对主体的作用机制。建立预测各环节可能发生突发事件的合适的定量模型。在此基础上, 根据各环节和各场景概率情况, 预测结果可以通过如图 5-9 所示的决策支持平台获得。

## 2. 语义网的挖掘与推理技术

场景数据库和计划数据库中搜索的快速性和智能性是场景与 EM 活动匹配的主要要求。用户使用传统的检索方法很难检索到相关资源, 并实现资源的语义信息共享。语义网在数据挖掘中的应用应着眼于以下几个方面:

(1) 数据挖掘。社会媒体的数据具有复杂性和异质性的特点, 并且数据中包含了复杂关系和依赖关系, 这对可被使用和可被发现范围的数据模型施加了强大的限制。

(2) 包含相关特征、属性和约束的大数据模型的建立。特别是元数据, 如回应、提到、参考文献、关键词、时间戳和地理位置, 需共享信息挖掘和信息质量处理的通用结构。通过分析场景数据库中信息资源的特点, 建

立规范化的元数据提取方法，用于提取应急的元数据和应急预案，并将其存储在元数据数据库中。

(3) 应急领域中的本体构建。首先通过社交媒体渠道的大数据（基于如 SIOC、MOAC 或 FOAF 的标准）开发一个本体结构急救相关数据，再开发一个可扩展的数据存储，实现本体的语义。其次，建立描述应急服务领域相关信息的模型，其目的是对诸如“事件描述”“警报”和“请求”等概念进行建模。

(4) 建立智能推理机制。为了实现有效的语义推理和检索，需要建立领域本体作为推理工具的内部表达模式。主要任务是创建两者之间的映射：领域相关的信息到社会媒体的信息，捕获紧急相关信息和处理的社会媒体数据之间的关联。因此，本体能够对异常模式、事变、事件检测和发现相关性进行语义分析和数据挖掘。

## 5.5 本章小结

---

本章研究了情境重构的可视化方法，分析了情境网络可视化仿真系统的主要任务，建立了相关情境描述及情境重构的可视化模型，设计了可视化模型的基本图元和图示化表示和实现，给出了计算机图形仿真的节点分布和全图优化的算法，描述了面向 GIS 服务接口的系统功能和操作设计，建立并完善了情境重构系统的仿真设计与实现。本书建立了基于大数据的协同应急决策平台，定义了包括电网在内的大型基础设施、交互过程与信息处理过程的特点，以及开发该平台需要的一些关键技术（数据挖掘、本体和语义数据存储、方案分析）。该平

台可以利用组织和个人公民这些信息源来实现应急管理，这些信息源实现了将单纯的官方数据扩充为广泛的社会媒体数据。本书的局限性主要在于无法获取合适的应急数据库，因此模型的实施和评估有待进一步研究。另外，还需进一步研究在应急事件检测和态势感知过程中的应急准备和应急阶段的具体过程。

## 第 6 章

# 非常规突发事件应对决策体系

- 6.1 应对决策集成体系构建
- 6.2 体系集成关系的系统动力分析
- 6.2 非常规突发事件应对任务的容错规划模型体系
- 6.4 本章小结



## 6.1 应对决策集成体系构建

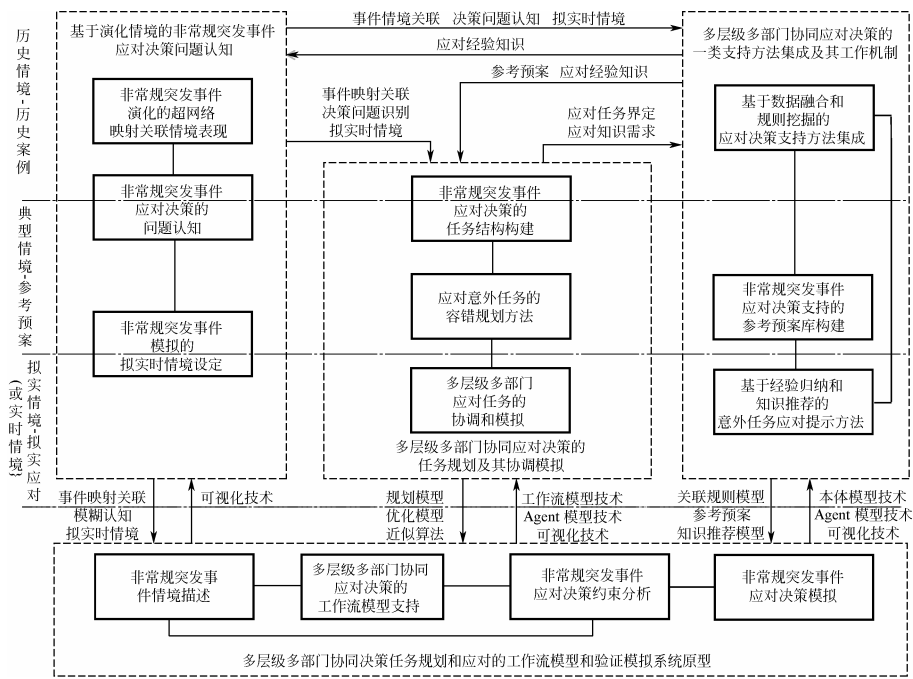
---

非常规突发事件应急管理的一个重要特征和主要难点在于决策主体必须根据阶段性的处置结果和突发事件的发展趋势动态地调整应对决策。应对决策涉及多层级、多部门、多阶段、多环节，具有多层空间关联、多时点问题序贯相关、组织知识差异和信息非完备的特点，形成错综复杂的非常规突发事件应对集成决策模型体系。需要构建多层嵌套并行序贯的应对目标模型及其总体集成与关联决策支持方法模型，以实现兼顾多层决策、协同决策、序贯决策和组织决策的非常规突发事件应对集成框架。非常规突发事件应对响应是一组包括紧急反应、事态控制、救治生命、疏散转移、物资供应、乃至预防准备等紧密相关的系统工程。

依据系统科学原理和决策执行过程，将非常规突发事件应急决策体系划分为决策目标与任务规划、决策约束、事件情境描述、应急 workflow 控制实施与决策实施和模拟五个部分，各部分之间不断发生耦合作用，并受社会、法律、文化等环境因素的影响，通过相互之间的能量和信息交换，推动决策过程动态发展。

非常规突发事件应对决策体系如图 6-1 所示。整个体系构成闭环式的结构。体系内的各个部分必须环环相扣、互相支持、全面联动，遵从系统性和统一性原则，使突发事件造成的损失和消极影响降至最低。各子系统相互独立，但在整个系统中相互作用、相互制约，并存在大量的信息反馈。系统通过高效、合理的信息反馈机制，促进各子系统的动态协调和规划，实现整体目标的最优化。它们相互关联、相互作用，形成多个反馈环，反

映了人口、经济、资源、环境之间的关系。通过模拟运算，可定量描述未来经济增长、产业结构变化、人民生活水平提高、就业、粮食供求状况、能源需求与生产发展、污染的排放和治理等。模型最主要的特点是力求反映不同人口方案和环境治理目标下，各变量之间定量关系的特性，通过不同人口方案与经济发展的定量分析、环境治理与经济增长的模拟，为制定人口政策、环境治理政策提供参考。



◎ 图 6-1 非常规突发事件应对决策体系

1. 决策目标与任务规划

对突发事件实施针对性的有效应对的首要步骤是对应对决策问题的认知，即通过认定及细化决策问题确认决策任务和目标。决策目标与任务是

决策方案拟订与实施的基础，对决策方案的制订具有决定性作用，也是决策效果评估的重要依据。按照对突发事件的主动应对过程，可以将突发事件总体上划分为预防预备期、应对期、恢复期三个阶段。应急管理的目的是通过应对决策提高对突发事件发生的预见能力、事件发生后的反应能力、决策处理能力，以及善后恢复阶段的学习能力，尽快从事件带来的危机中恢复，尽可能减少突发事件造成的损失。从各个阶段的通用应急任务和目标来看，预防预备期的主要任务是监测和防范突发事件的发生，或者把极端突发事件降低到低影响事件，其关键在于监测、识别和预备能力；应对期的主要任务是及时控制突发事件并防止其蔓延，其关键在于对决策问题的识别和快速决策反应，以及多部门协作的决策执行能力；事件恢复期的主要任务是对整个事件处理过程进行调查评估并从分析反馈中获益，其关键在于善后学习能力。非常规突发事件应急决策目标系统具有递阶控制特点，对应对的不同阶段，决策目标和任务规划方式动态变化，并且在各阶段的通用应急任务和目标基础上，还存在着与事件演化相关的一些意外任务，需要针对性地识别和规划。决策实施过程中需要将总目标分解成局部目标，并利用各级局部决策单元进行控制和协调。从不同应对层级考虑，则需要研究对应对决策多目标的综合权衡，包括人员伤亡、财产损失、环境破坏、救援时间、救援成本和公众影响等要素。同时，决策目标和任务的确定或调整要以事态发展状况和方案实施效果为依据，且因灾害严重程度与灾情发展阶段而异。因此，应对决策目标和任务规划需要由包含预案数据和实时描述数据的情境描述网络的信息支持。

非常规突发事件常常形成复杂灾害链，并要求在尽可能短的时间内处理以减小损失。其应对决策问题多属于非结构化和半结构化问题，常规的



任务及目标分解方法对其作用有限，需要在事件情境网络的支持下，依靠决策执行和模拟部分提供对应识别分析方法，描述应对问题结构特征，构建应对决策分析途径。

## 2. 决策约束

非常规突发事件应急决策的约束系统主要涵盖情境约束、资源约束和能力约束三个方面，包括时间、物资、组织与人力资源、信息及管理、环境和技术等要素。非常规突发事件的资源需求具有急迫性与动态时效性，需要根据事件情景变化和前一阶段救援效果动态多阶段调整；应急决策内外环境变动急剧，造成局部关键资源与信息稀缺；非常规突发事件的发生规律和演变机理复杂，人们对其认知有限，管理机制及技术水平亦成为应急决策系统的重要约束条件，需要区别应对组织在不同阶段的协同约束差异。

时间约束主要体现在事件的突发性和灾害危机的紧迫性，决策者不可能有充足的时间分析事件，必须在尽可能短的时间内迅速做出决策，否则会造成危害的进一步扩大。体系中其他部分必须对速度和效率进行严格要求，满足这一关键约束。

信息约束主要体现在决策中信息处理的以下几个方面：首先，信息是不完备的。由于突发事件事态本身的不确定性，信息是随着事态的发展而动态演变的；同时也由于爆发瞬间造成的广泛破坏性，常规情况下的很多比较容易获取的信息也变得难以掌握。其次，信息不及时。由于突发事件事态发展的急剧变化性，而且信息要从事发现场层层传递到众多决策相关部分，信息的掌握和控制常常是滞后的。最后，信息不准确。由于事件造成的混乱和心理上的紧张，应急决策在信息反馈和处理过程中，极易造成信息失真，信息正确性和有效性难以保证。体系中的情境描述网络需要

信息的有效支持,在此类约束下,必须依靠预案情境的基础并发展学习型知识处理方法。

### 3. 情境描述网络

有效识别突发事件的实时状态和发展趋势,是有效应对的前提。非常规突发事件的发展演化过程受到众多方面因素的影响,这些因素涵盖了与突发事件紧密相关的社会环境、组织结构、设备设施、信息知识的传播等。这就决定了突发事件节点之间的关系并不仅仅是由单一因素构成的关联关系,而更可能是多种因素组合促成的复杂关联关系。为界定事件链上相关影响因素并严格量化影响因素权值与比重,这里将影响突发事件演化的众多因素进行分类,归属到不同的属性网络中,得到由事件链网络和相关因素网络构成的突发事件演化网络组成结构及各个网络的拓扑结构表示。总体上可以将事件因素分为组织因素、设备因素、社会因素、信息因素等。同时,针对具体的突发事件,可以在上述相关因素网络的基础上扩展构建新的相关网络。从网络构建的拓扑结构上,它们具有一定的共性特征。但在具体的点、边、权设置上,则需要对不同的属性网络进行独立研究。

在多属性网络拓扑描述基础上的演化分析重点包括与非常规突发事件动力学演化分析相关的网络拓扑属性,包括路径长度及平均最短距离;集聚系数及分层指数;节点度分布和度指数;度相关,介中性相关和同型系数;介数分布和负载量指数;社团结构测度;网络自相似测度等,以及有向加权网络的特有属性:强度分布、加权最短路径、加权聚集系数等。根据对五个网络的拓扑结构定义和拓扑属性,采用增加和删除网络中节点和连线来模拟非常规突发事件爆发后对网络的破坏和修复状态,继而探讨非常规突发事件基本相关网络随突发事件的发展而演变的特征。将针对网络

破坏情形下的处理过程作为预案的组成部分，形成预案库，作为和现实事件的对应情境的匹配集对。

#### 4. workflow协调控制

成功应对非常规突发事件，需要准备体系的充分适应性构建和应急组织实时决策的合理决断执行，workflow模型是支持相关规划和确认的基本实现技术。针对典型重大灾害多层级、多部门协同应对任务流程的规划情境，在组织结构、事件进程和约束支撑的三维任务规划框架内，针对应对决策通用任务、特殊任务、经验性任务和失败补救任务，挖掘其任务流程容错规划的问题本质，应对决策支持模型方法体系需要研究多层级、多部门协同应对任务执行流程的规划方法，研究基于应对决策流程的应对任务流程规划准备及其优化，实时确认下达和应对现场及时改进等方面构成的工作机制，研究相关工作flow模型分析方法和实现技术。workflow协调控制部分重点研究以下几个方法：

（1）多层级、多部门协同应对任务执行流程的规划方法。在组织结构、事件进程和约束支撑的三维任务规划框架内，剖析应对任务规划的科学持续改进问题，厘清多层级、多部门协同应对任务的动员权威与协同协调的规划关联，构建支持快速反应和有效应对的组织设计和实时重组模式，揭示相关应对决策与任务流程之间的合理关系；构建通用任务和特殊任务中的预防、保护、应对、恢复等任务流程群组合模块化，研究基于多层次复杂网络的应对任务流程基本规划、拓展规划和容错规划，探讨相关的准备体系构建策略，提炼应对任务流程的三类规划方法，形成相应的规划模板。

（2）多层级、多部门协同应对的决策流程和任务流程的实时确认改进机制。剖析基于状态空间的规划和基于规划空间的规划等方法的借鉴价值

和改进空间,厘清非常规突发事件的应急态势变化、准备资源缺失变化、应对能力不足变化和目標变化等所导致的影响,研究应对决策的合理流程,研究特殊任务、失败补救任务、经验性任务、意外任务等任务的实时确认和及时改进途径,研究不确定信息和算法复杂性约束下的决策分析近似快速算法,提炼实时应对的快速改进规划方法。

(3) 多层次、多部门协同应对的工作流模型方法。根据组织结构、事件进程和约束支撑的三维任务规划需求,分析非常规突发事件应对任务流程的目标选择、基本程序、参与部门、实现手段等方面的现实要求,研究相关工作流的形式化语言描述,研究应对组织角色定义、应对任务流程构成描述、任务流程间的执行条件规则、信息-模型-知识需求定义、组织执行和软件应用程序、工作流执行过程监控等基本问题,归纳提炼应对工作流模型技术、研究工作流模型实现机制。

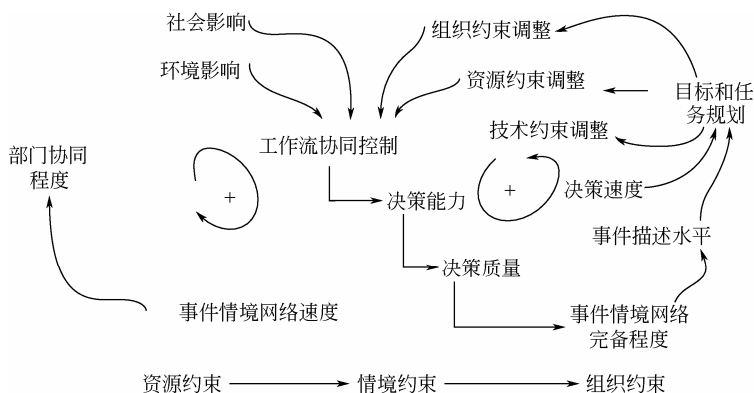
## 6.2 体系集成关系的系统动力分析

---

非常规突发事件应急决策具有明显的动态特性,是阶段性处置结果和突发事件发展趋势的动态博弈过程<sup>[127]</sup>。应急决策的动态调整即通过横向信息反馈和耦合,在工作流协调的作用下,实现各部分的协调和稳定;动态应急决策的有效执行,还需要根据大系统控制原理进行递接序贯控制并接受纵向信息的反馈。

系统动力学(System Dynamics)主要研究系统内部的组织结构、物质流动、信息流动及其形成的反馈结构,并由此构建系统的动态模型,解释系统的动态行为。系统行为模式的特性主要取决于其内部的动态结构与反

反馈机制；系统在内外动力和制约因素的作用下按一定的规律演化。其模型主要包括因果关系反馈图和流程图，因果关系反馈图是对系统问题的定性描述，是系统动力学仿真的基础。应急决策的目标和任务规划、决策约束识别、情境描述网络、工作流协调控制以及实时决策方法模型相互作用、相互影响，存在复杂的因果关系。任何一个模型的变化，将导致整个应急决策系统的变化，信息在各模型之间反馈，从而影响系统的决策行为。非常规突发事件应急决策模型体系的 SD 因果关系如图 6-2 所示。



◎ 图 6-2 非常规突发事件应急决策模型体系的 SD 因果关系

在应对决策协同过程中,辅助决策机构对事态发展与方案实施效果的准确、动态评估,直接影响救援投入、救援时间、污染控制等目标系统要素的确定与实现。非常规突发事件社会影响和环境影响较大,其决策目标包括最大限度地降低事件造成的损失、应急资源的最有效利用及社会效益的最大化等。良好的应急决策系统能通过目标协同负反馈环的自稳定作用,及时调整目标系统各要素,将事件的影响控制在一定范围

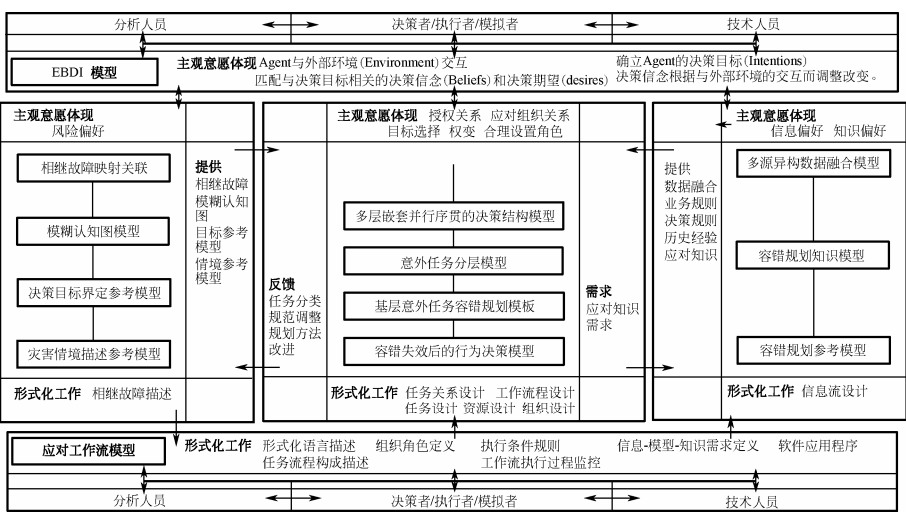
内，实现目标综合优化。通过分析非常规突发事件应急决策体系和 SD 反馈模型，非常规突发事件应急决策支持表现为具有自强化作用的正反馈环，在决策目标和任务规划及决策约束的协调中保持稳定。作为应急决策的协调核心，决策 workflow 控制是应急决策大系统的协调器，协调应对决策的序贯运行。在非常规突发事件多层次、多组织协同机制的推动下，整个系统处于动态稳定、良好发展的运行状态。非常规突发事件本身和突发事件应急决策都是复杂的系统工程，需要研究突发事件的本质特性和决策管理的机理，提供相适应的决策支持模型方法。本书对非常规突发事件应对决策支持涉及的模型方法进行了系统阐述，提出了支持有效反应的非常规突发事件应对决策支持集成。决策目标与任务规划、决策约束、情境描述网络、workflow 协调控制四个组成部分之间通过信息流动和反馈，构成非常规突发事件应急决策闭环体系。依据系统科学理论，建立 SD 因果反馈模型，揭示应急决策系统内在反馈机制和动态作用机理。在现代应急管理思路下，该体系有助于构建一个全方位、多角度的应对决策支持系统。对于提高全社会面对突发事件的应急管理水平具有一定的意义及参考价值。但是，任何体系都有一定的局限性，在应急管理的实际过程中，该方法体系需要不断进行调整与完善，以保持其科学性和高度适应性。

## 6.3 非常规突发事件应对任务的容错规划模型体系

---

在相关研究的基础上，针对应对任务的容错规划，本节将提出应急-

准备模型方法体系（MEPM）框架，模型集成关系如图 6-3 所示。



◎ 图 6-3 非常规应对任务容错规划模型的集成关系

### 6.3.1 灾害情景规划模型构建

灾害情景规划模型包括两类模型：面向实时灾情态势研判的灾害情景态势模型，供准备、学习和模拟的灾害情景重构模型。与之相关的情景基元模型来自支持类模型组。

#### 1. 灾害情景态势模型

实时灾情态势研判，目的在于快速、及时判定灾害的等级程度、影响范围和应对难度，以便决策者识别态势走向、衍生事件演化阈值和最危险情景。灾害衍生存在事件链规律，次生事件节点的出现，是其前序事件与孕灾环境共同作用的结果，体现了灾变的质变演化和外延发展。模型构建框架如下：

(1) 把握来自灾区前线的信息和其他监控信息, 借鉴可用历史情景和历史案例, 利用情景描述技术, 形成基本灾情表达;

(2) 描述事件状态, 寻找突发事件链-事件状态-影响因素(Event-State-Factor, ESF) 三层情景描述网络之间的时空关联, 挖掘其间可能的直接、间接、单双向、顺逆向关联情景, 寻求细化和凝结的因果关系;

(3) 分析事件影响区域内承灾体的触发要素, 揭示相关的能量传递、物质传递和信息传递, 界定危险源的灾变临界点, 实现态势预测。

## 2. 灾害情景重构模型

在“情景-应对”范式下, 为演化分析构建由信息到情景构成要素, 到情景描述, 再到情景演化, 最后完成情景重构的研究框架:

(1) 基于历史案例和现实需求, 根据情景特征的重要性、历史经验有效性、动态变化等, 提取情景表现的需要, 确定情景的表示方法, 在灾害链事件映射关联分析框架内, 提取相关自然因素(气象、地质、地理等)、布局因素(设施、资源、能力、组织等)、时间因素(最佳救助期限、时间之窗等)及情境要素与情境状态之间的关系, 归纳总结对灾害事件应对任务的预备规划、应对反应及恢复过程中有较大影响的相关驱动因素作为情境的关键空间要素;

(2) 在情景输入、情景输出和情景驱动三个层次上, 描述情景构成要素;

(3) 基于情景演变选择, 在灾害突发事件的发生、发展、演变和终结四个演化阶段, 根据现实案例组合致灾、承灾体、运孕灾环境要素, 形成灾害事件状态描述;

(4) 构建灾害链, 推演灾害事件顺序情景引发的并行序贯过程, 揭示其因果性和逻辑关联关系;



(5) 在模拟的灾害想定中,需要对灾害的想象力,以体现对灾害链内在复杂耦合关系,填补对次生衍生灾害发生机理的理解缺欠,形成易于理解的灾害链“全景图”。

### 6.3.2 任务容错规划模型构建

非常规突发事件应对的意外任务容错规划,是为解决应对任务适应性和参考预案可用性难题而设计的。容错规划中的“错”指的是未曾预计到的故障或故障程度,“容错”指的是在故障估计不足的情况下准备的特殊预案仍有价值,其规划成果进行适应性修正后可以用于应对。容错规划应提供对预估意外任务的行动预案,以及更大范围内的资源储备、能力储备、知识储备等需要资本投入项目规划。主要包括:构建意外任务分层模型、基层意外任务容错规划模板、容错规划工作机制。

#### 1. 构建意外任务分层模型

对于意外任务,在预防准备规划阶段,决策者和应对组织对意外的考虑只能来自情境的设计,仅是一种情况的想定。基于分层任务网络(HTN)理论,设想意外任务分层模型的构建:在事件链的分布环节上,识别判断灾害的产生、分类、属性、表现过程及其应对需求等,分析确定其在预见、经历和准备等方面的特征,定义其是否属于意外任务;根据灾害事件的地域、时机和应对需求,勾勒事件链-状态链-因素链的分布,解析其在顶层、中层和基层的任务分布和分解,可以在三大层内部适当细分层,描述意外任务属性,生成相应任务的粗粒度列表。

#### 2. 基层意外任务容错规划模板

容错规划模板是用于基层参考预案的工作样板,包括:

(1) 意外情境。基于ESF模型,描述非常规突发事件的意外情境;情

境问题决定了决策模式选择，意外任务应对决策需要综合不同模式。

(2) 可用资源。构建意外任务 HTN 模型，描述相关意外任务层次的资源需求、资源约束、资源关联、资源替代等客观约束条件；资源是广义上的，包括时间、人力等方面的考虑。

(3) 应对目标。选择应对的合理目标，如有需要，目标软化、价值函数替代效用函数等都可作为目标界定方法。

(4) 任务分解。基于意外任务分层网络模型，或由上层任务逐层分解形成基层的基本意外任务及其执行流程，或由基层意外情境推导意外任务、进而聚合成为上层意外任务，形成意外任务网链集合。基于非结构化和半结构化的决策问题和数据信息资源，界定危险源扩展和任务目标适应软化，要求时间压缩、资源配置可达紧迫和极限能力挖掘，明确应对方案创意，提出任务确认机制和快速反应途径，归纳提炼应对具有非结构化和半结构化问题特征的意外任务架构及其分解表达方法。

(5) 容错渠道。容错渠道是体现容错规划的标志，有三类容错渠道可供选择：第一是任务容错，例如，面对电网破坏，以往多强调修复任务，在时间紧迫的条件下，修复任务的容错替代可以是关键场所的临时供电措施；第二是流程容错，准备多个完成任务的流程，其前提条件是组织和资源的可用性，例如，提供应急供电设施的不同送达路径；第三是资源容错，由于资源不可达而需要的多个资源替代方案，例如，选择不同的应急供电设施。在一个任务环节构建容错渠道，可能引发一系列容错变化，需要检查意外任务依赖关系约束，连续确认序贯决策任务的容错关联，实现意外任务的序贯容错规划。

(6) 关系协调。根据意外任务依赖关系约束，设计基层应对任务型组织在权威动员和协商合作情境下的合理协调规则。

(7) 准备匹配。受限于资源关联约束,可能获得能力组合激励,形成基层意外任务容错应对求解的约束满意优化集合。

(8) 任务表述。借鉴贝叶斯网和多层规划方法,提出意外任务容错规划的模型表达思路:根据顶层、中层和基层决策的不同决策类型,提出直观决策、模糊决策、有限理性决策等决策任务的分类模型,构建贝叶斯网尝试集成表述,将贝叶斯网嵌入多层规划,探索合并解释的任务模型集成途径。对于大面积停电或电网基础设施破坏突发事件的意外任务,应用意外建模方法挖掘数据提供规则,借鉴马尔可夫过程或半马尔可夫过程模型(若意外任务具有马尔可夫性或半马尔可夫性),定义次生意外任务表述的决策阶段、状态空间、行动空间、状态转移、转移概率(客观概率或参考客观概率或主观概率、非常数、时间相关、网络分析评价权重)、目标函数和风险态度等基本参数。

(9) 求解策略。首先对顶层决策进行求解,自上而下对低层决策进行求解。上层决策的结果是下层决策的约束,下层决策则是上层决策的细分。除了继承上层决策的状态空间外,下层决策还具有自身的状态空间。多层嵌套任务模型,其复杂应对决策问题逐层分解为较为简单的决策问题,有助于降低非常规突发事件应对决策的复杂性。

(10) 能力提升。在意外任务分层上的能力激励考虑,可以反映应对组织的主观能动性。基于同样的资源,参与者不同的能力可以导致不同的效果。应对意外任务的容错规划,如何挖掘可以促使资源高效利用的途径,这是容错规划的难题。

### 3. 容错规划工作机制

下述为意外任务的容错规划工作机制的分析依据和关注焦点:

(1) 任务型组织重构。针对意外任务,任务型应对组织的重构要点集

中在对未来不测的设想上,包括:情境构想前提与实际情境、组织重构策略构想前提与实施策略、临时组织构想前提与组织重构逻辑、临时应对组织结构与实际组织、以电网等关键基础设施的应对组织为例的模型衔接、组织适应性的实时计算复杂性及其近似算法等。

(2) 容错规划的证据处理。容错规划的主要信息来自历史案例和不完备数据,这些信息常常是冲突的,需采用证据的一致度分析方法解决异源异构冲突性问题。

(3) 容错规划的差异识别。从规划和执行两个角度出发,在情境差异层、目标变动层、备用方案层、可用资源层、可用能力层等方面,研究容错规划所需要处理的差距(所容“错误”)。识别重点:针对情境差异和目标变动,通过分析新情境的困难所在,比照可用资源和可用能力,定义为实现容错所需要调整的应对标准,描绘可能的失效模型,确定所实现的容错等级。

(4) 容错机制的实时性。容错规划必须考虑其任务执行程序实时性,任务的基本时间属性包括任务的到达时间、响应时间、任务时限等;任务响应时间是指从任务到达时刻起到任务完成时刻止的一段时间;任务的响应时间必须小于任务的时限,否则意外任务就会执行失败,造成严重的后果;任务进入执行之前,需要对任务进行可调度性分析,认知容错的最差态势是其可调度性分析的基准。

(5) 容错机制的代价性。容错性是以应对资源储备、应对能力建设和应急能力储备为代价的,意外任务容错机制选择的关键问题之一是如何在布局储备的容错成本与灾害风险之间进行权衡取舍,需要结合经济学成本分析和多方博弈分析,提出基于政策视角的社会成本分析和多方合作分析方法。

(6) 容错机制的不确定性。容错规划者的风险态度描述可采用基于效用理论的模型方法,即通过基于决策者的风险偏好来对多个决策方案进行评价。但是,在动员状态下,尤其是灾害爆发和初期应对响应阶段,应是基于任务结构的模板选择,基于效用的考虑难以解释现实实践。同样,在其后的阶段,应对决策不仅需要基于效用理论评估已有预案或新的决策方案,还需要解决如何基于任务规划者的风险偏好来构建最优决策方案。本书将尝试采用以下两种方法来考虑风险因素:第一,应对决策者承担风险的效用函数。首先,基于效用理论,提出复杂灾害任务规划者的典型风险偏好态度;其次,构建规划者风险效用函数,其数学形式通常为非线性函数,需要解决求解难题。第二,构建冲突证据的信任度来替代表示风险偏好的效用模型。首先,求证证据是否冲突(证据之间是否为矛盾证据);其次,确定一个冲突阈值,冲突阈值的确定是对基于直觉模糊集的融合结果和 D-S 证据理论的融合结果相比较,根据其误差的大小来确定证据的冲突阈值的大小;再次,计算冲突证据的信任度,可以考虑通过直觉模糊集来实现,即从多元信息到基本概率分配函数(信任度)。

(7) 基层意外任务容错规划的主观因素。基于全局性的目标选择和任务分布,定义基层应对任务在非常规突发事件整个应对过程中的作用,限制基层应对任务的容错偏好,确定所需要的基本资源和基本能力,分析完成应对任务所必须达到的目标能力激励。

### 6.3.3 知识支持集成模型构建

#### 1. 数据融合模型

提供相关多类异构数据的语义关联和语义融合方法,提供由非简约

语义关系处理至应急应对问题识别结构化直至相关知识表示的技术，形成实现数据和知识的基于语义的应急应对知识（规则）的供需匹配衔接通道。

## 2. 知识本体模型

构建本体模型，由元模型和组合模型构成，借此获取、描述和表示意外任务容错规划的相关知识，形成共同的容错规划知识概念体系，包括意外任务属性、属性参数约束和依赖关系、突发事件概念及其属性特征、容错规划的目标描述、灾害情景态势描述、应急资源分类体系、分类应急资源特征等。

## 3. 参考推荐模型

根据知识本体模型和数据挖掘模型，形成相关参考模型库，例如，应对决策目标界定参考模型，提供不同情境建立决策目标集的借鉴，用于分析应对决策问题结构与应对决策目标的互约束关系。又如，容错预案推荐，支持采用案例推演（CBR）技术，分析应急应对中可能出现的冲突，形成容错规划的预案链。

在模型构建方面，主要是相关工作流模型，提供巨灾意外任务容错规划的情景描述、目标选择、基本程序、参与部门、实现手段等方面的工作流的形式化语言描述技术支持，辅助解决应对组织角色定义、应对任务流程构成描述、任务流程间的执行条件规则、信息-模型-知识需求定义、组织执行和软件应用程序、工作流执行过程监控等基本问题。并考虑基于信念-愿望-意图（Belief-Desire-Intention, BDI）模型，体现应对组织的推理意图逻辑和决策目标选择，形成多层次、多部门协同应对意外任务的联合意图表达，体现应对组织的承诺和联合承诺，描述多目标、多方利益的权衡，可以作为预防准备规划的博弈分析的依据，也可以作为实时应对规划

采纳的可执行分析的基础。

## 6.4 本章小结

---

本章研究了在巨灾的灾难情景规划、应对准备规划、应对任务规划和关键基础设施容错设计等要素领域，构建巨灾应对建模方法的可借鉴研究基础。针对巨灾背景下的巨灾应对任务规划需求，提出一种用以刻画应对-准备互为关联的系统建模、构建与部署的应急-准备模型方法体系的概念性框架。巨灾意外任务应对机制异常复杂，要使这一机制系统合理有效，应有相应的应急-准备模型方法体系（MEPM）来支持。本章对 MEPM 进行了系统阐述，从集成水平出发，在情景规划、容错规划、知识支持、工具支持和意愿行为五个领域构建了模型，构建了基本概念体系框架，为巨灾意外任务容错规划提供了实现途径。

## 第 7 章

# 非常规突发事件应急决策 及情境重构案例研究

- 7.1 生产中断情景下供应链销售应急决策研究
  - 7.2 复杂电网中的连锁故障应急研究
  - 7.3 2008 年冰雪灾害应对案例
  - 7.4 本章小结
-





## 7.1 生产中断情景下供应链销售应急决策研究

---

近年来,世界范围内发生了很多灾难事件,包括自然灾害、恐怖袭击、传染性疾病等。根据 Gartner Group 的资料,40%的公司在经历大灾难后再也不能恢复运作,另外 33%的公司在两年内也接连倒闭。除了这些灾难性事件,更为常见的是各种严重程度不同的微观领域内的不确定事件,如需求信息变化、供给中断、生产设备意外毁损等,这些事件也给企业的经营带来了很大的影响。与单个企业相比,突发事件给供应链系统带来的不确定因素更加复杂,破坏性更大。Richard Wilding 指出不确定因素对供应链宏观战略和微观运营将产生重大影响。由于供应链中的企业往往从上游企业购买原料,进一步加工后销售给下游企业,因此供应链中的不确定因素可以划分为:不确定供应、不确定需求和生产系统中的不确定因素。供应链应急管理的研究多集中在需求和供应领域中的不确定性问题。Søren Glud Johansen 等<sup>[128]</sup>提出了应对不确定需求的应急供应模式,Tagaras George、Vlachos Dimitrios<sup>[129]</sup>和 Chi Chiang<sup>[130]</sup>分别研究了带有紧急订单的定期检查存货系统的最优订货策略。考虑到供应中断情况,Esmail Mohebbi<sup>[131]</sup>论证了有关分布假设。Mahmut Parlar<sup>[132]</sup>研究了随机供应中断下的连续观测存货控制问题。刘春林等<sup>[133]</sup>分别针对一次消耗应急和连续消耗应急,研究了多出救点的组合优化问题。Kirstin Zimmer<sup>[134]</sup>研究了供应链中不确定性及时供应的协调决策。Qi 等<sup>[135]</sup>研究了突发事件造成市场规模变化的影响,使原有基于供应商生产计划的协调供应链不再协调,通过调

整原有协调机制使得供应链在新的协约下达到协调。Yu Hui 等<sup>[136]</sup>探讨了以下规律：突发事件造成需求敏感系数变化，继而导致对利用经典数量折扣契约进行协调的供应链造成影响，建立了相应的具有抗突发事件的数量折扣契约。相对于这些研究，生产系统中不确定因素方面的研究还比较少。Min Soo Suh 和 Albert Lee 等<sup>[137]</sup>研究了企业内部供应链应对生产中断的策略，考虑到生产设备故障、中间产品未达到质量控制标准等原因可能造成企业生产中断，他们提出了基于约束满意方法的响应规划程序，其核心是作业排序方法。为解决系统某一环节对生产中断的响应可能对相关环节产生的影响，Thomas Tsukada 和 Kang G. Skin 提出了一种生产恢复智能模型，借助于人工智能中的谈判技术，用于模型求解<sup>[138]</sup>。总体而言，对于生产系统中的不确定因素，目前的研究主要集中在生产恢复方面，较少注意到生产中断对分销商、零售商的影响。在复杂多变的市场竞争中，各种突发事件有可能导致企业生产中断，使分销商、零售商面临着缺货风险，需要应急决策方法控制缺货损失并提高供应链获利水平。例如，在突发性的公共卫生事件或自然灾害等事件影响下，有些生产企业被迫停产一段时间，供应链中断风险变为现实。显然，这样的突发事件将对生产企业产生重大影响，使其不得不调整销售与物流计划。如果分销商或零售商不接受这样的调整，由于此类事件多属不可抗力，从法律上而言，往往并不能获得诸如违约金之类的补偿，反而要承担较高的缺货损失，市场需求也无法满足。当交易双方都同意对销售与物流计划做出调整之后，关键的问题就变为如何对分销与物流决策做出科学调整。即使损失难以避免、客户需求无法全部保证，也要使损失降到最低、最大限度地满足客户需求，或者说，使重新规划后供应链获利水平尽可能大，缺货成本尽可能小。

### 7.1.1 约束理论与约束满意决策方法

#### 1. 基于约束理论的供应链生产/分销系统

约束理论（Theory of Constraints, TOC）认为，在供应链这样一个环环相扣、紧密联结的链条中，各个单位之间相互依赖，每个个体的行为都会影响整体的绩效。供应链的盈利首先来自增加有效产出，然后才是库存的减少和运行费的减少。而库存和运行费用不可能无限制地减少，最理想的状况是减少到零，就再没有改变的余地了，但这又是不现实的。产出的增加可以根据企业的实力和相关的环境条件进行更快的改变。这种管理模式的应用可以避免企业内部及企业之间进行“资源大战”，促进在业务过程中的协作和沟通。因为一旦在局部出现问题（企业的“约束”），那么整个链条的资源就会被其制约。

TOC 认为供应链管理研究的重心应由采购和制造向需求方转移。供应链表现为有市场和客户驱动的“需求链”，强调整合供应链中生产分销资源，以客户的满足为目标，不但关注供应链中制造供应链的生产能力，而且还要研究如何充分利用现有网络和开拓新的分销网络。

首先，生产系统是供应链整体的一个组成部分，是系统产出的关键，对其他环节产生重要影响。生产系统的运作战略作为供应链战略的一部分是不能独立存在的，要把它置于供应链大系统中进行考察。在垂直方向上，从产品设计、物料采购、加工制造、直到销往市场；在水平方向上，扩展到供应链中其他成员，进行全面的系统分析。因此，一旦生产系统受到突发事件影响而产生中断，需要供应链其他环节，尤其是分销网络具有相匹配的应急策略进行支持。

其次，分销环节越来越受到重视。分销网络可以大大降低整体成本并

能更好地满足消费者的需要。供应链管理中生产分销是整个系统的重要部分，也是其中的关键流程。在供应链中，不再给予两者明显的分别来区别对待，而是结合供应链管理的集优化思想，从系统的角度，把生产分销看成一个整体，一个是以原料为输入、以产品为输出的系统，另一个是管理的主体。把供应链系统资源与市场需要联系起来，进行生产分销战略整合，然后在供应链整体战略指导下制定生产、分销的操作层方案，这种从整体到局部的决策过程和方法，有利于保证总体战略的成功实施。两者的结合，有利于进行战略层和操作层决策，更有利于形成系统优势，充分利用系统资源，发挥最大潜能。

TOC 不再把生产看成满足销售的方式，重新理解生产和分销在为企业争取营业额和利润方面所发挥的作用，把生产看成促进销售的方式，分销看成生产能力有效发挥的基础，以两者的结合来完成系统的整体目标。但作为供应链中两个环节的生产/分销与供应链系统整体之间存着冲突，一是要维护有效产出，二是要降低成本。生产商和分销商从不同的角度进行决策，都希望以较低的成本来换取自身利益的最大化，结果导致局部的最优，但这并不一定能带来系统的整体最优。通过对供应链的管理，加强对供应链中的物流管理，使之更加稳定地贯穿生产和分销的流程。而对于整合供应链生产分销模型，尽管已经有学者做过一定的探索，大都以降低成本为目标，还未曾有人提出以约束理论为指导的模型。

## 2. 约束满意优化方法

在突发事件应急决策环境下，所要达成的目标和协调面临的约束都是多样的，而决策过程中决策者偏好往往扮演了非常重要的角色。在强烈的时间限制条件下，多目标全局最优化通常是不现实的，决策者需要在目标之间进行权衡，在各子目标均满意的基础上，寻求整体满意度最高的决策

方案，称为约束满意优化（Constraint Satisfying Optimization, CSO）方法。因此，对生产中断情形下的供应链应急决策，采用约束满意优化方法是一种必然的选择。约束满意优化方法包含以下三个方面的内容。

### （1）约束

突发事件具有突发性的特点，往往带来紧迫性的决策协调需求。约束一方面体现在时间方面，要求决策在一定的时间限制下做出，留给决策者进行分析和思考的时间非常有限；另一方面在有限的时间内，往往很难像在制订计划决策时那样可以统筹安排人、财、机器设备等资源，可用的资源是相当有限的。

### （2）满意优化

应急决策需求下的供应链，受制于一定的约束条件，同时往往需要实现多个目标。按照现代控制论的观点，决策面临的约束条件和所需要实现的目标可以互相转化。这些目标（约束）之间很难同时取得最优，获得对问题而言最优的方案。决策者改进某一目标，不得不在一定程度上对另一目标做出让步。因此，最终的决策结果必然是一个满意决策，而非最优决策。决策者不得不接受“满意”的解，因为往往并没有别的选择。

### （3）偏好与满意度要求

对于不同的目标或约束，不同的决策者具有不同的偏好体系。例如，获利在某一个水平上时，有的决策者认为是可以接受的，而有的决策者就认为是不可以接受的。因此，在决策中应该体现决策者的偏好。同时，对于某个目标或约束，决策者有一个尺度，即满意度要求。高于这个满意度要求是可以接受的，低于这个尺度就是不可以接受的。在企业实践中，这种偏好贯穿于决策过程中，但传统的最优化方法并不支持决策者偏好的体现。

### 3. 约束满意优化过程

#### 1) 约束满意优化问题的基本形式

如前所述，约束满意优化问题通常是一个多约束多目标的优化问题。

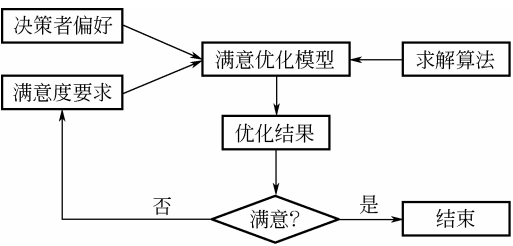
其标准形式通常为：

$$\begin{aligned} & \max \quad f_i(x) \quad i \in [1, m] \\ & \min \quad g_j(x) \quad j \in [1, n] \\ & \text{s.t.} \quad c(x) \leq 0 \end{aligned} \tag{7-1}$$

式中， $x$  为决策向量； $f_i(x)$  为  $m$  个向极大化方向发展的目标； $g_j(x)$  为  $n$  个向极小化方向发展的目标； $c(x) \leq 0$  为约束条件。

#### 2) 约束满意优化问题的求解过程

约束满意优化问题的求解过程可以划分为偏好识别、满意优化模型求解和决策者偏好调整规则三个阶段，如图 7-1 所示。



◎ 图 7-1 约束满意优化问题的求解过程

#### (1) 决策者偏好识别

决策者可以采用各种形式的函数来表现其对目标函数在不同水平下的满意程度，即偏好体系。为了帮助决策者识别其偏好，通常可以首先确定各个目标在约束下的极大值和极小值，然后在极小值和极大值区间范围内，选择满意度的表现形式。

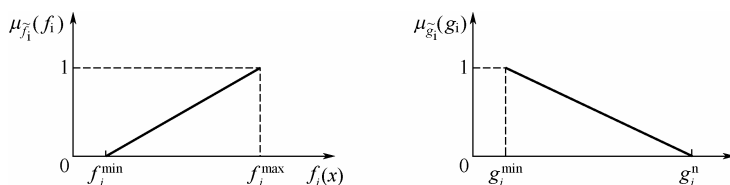
对于目标函数  $f_i(x)$ 、 $g_j(x)$ ，分别计算其在约束  $c(x) \leq 0$  下的极小值和极大值，将其分别记作  $f_i^{\min}$ 、 $f_i^{\max}$ 、 $g_j^{\min}$ 、 $g_j^{\max}$ 。

在刻画满意度表现形式时遵循如下两个原则：

① 当目标函数取值为  $f_i^{\min}$ 、 $g_j^{\max}$  时，决策者的满意程度达到最小值，记为  $\mu_{\tilde{f}_i}(f_i) = \mu_{\tilde{g}_j}(g_j) = 0$ ；当目标函数取值为  $f_i^{\max}$ 、 $g_j^{\min}$  时，决策者的满意程度达到最大值，记为  $\mu_{\tilde{f}_i}(f_i) = \mu_{\tilde{g}_j}(g_j) = 1$ 。

② 决策者具有理性。对于正向目标，即决策者希望向极大方向发展的目标，目标函数值越高，决策者的满意程度应该越大，即决策者对正向目标的满意度是目标函数值的单调增函数。对于反向目标，即决策者希望向极小方向发展的目标，目标函数值越小，决策者的满意程度应该越大，即决策者对反向目标的满意度是目标函数值的单调减函数。

进一步，由决策者指定目标函数在极小值与极大值区间上，其满意度的表现形式  $\mu_{\tilde{f}_i}(f_i)$ 、 $\mu_{\tilde{g}_j}(g_j)$ 。表现形式可以是连续函数，也可以是离散函数。图 7-2 给出了常见的线性满意度函数。



◎ 图 7-2 常见的线性满意度函数

## (2) 构建满意优化模型及求解

采用满意度函数取代原来的目标函数，形成了满意优化模型，如式 (7-2) 所示。



$$\begin{aligned}
& \max \quad \mu_{\tilde{f}_i}(f_i), \quad i \in [1, m] \\
& \max \quad \mu_{\tilde{g}_j}(g_i), \quad j \in [1, n] \\
& \text{s.t.} \quad \mu_{\tilde{f}_i}(f_i) \geq \bar{\mu}_{\tilde{f}_i} \\
& \quad \mu_{\tilde{g}_j}(g_i) \geq \bar{\mu}_{\tilde{g}_j} \\
& \quad c(x) \leq 0
\end{aligned} \tag{7-2}$$

借助于层次分析法（AHP）等方法，决策者可以确定不同目标之间的权重，将多目标优化问题转化为单目标问题。依据具体情况采用遗传算法、蚁群算法等智能算法进行求解，也可以自行设计相应的算法。

### （3）调整偏好参数

随着问题的深入，决策者的偏好体系可能发生动态变化。此外，当获得求解结果后，决策者可能会希望调整其满意度的表现形式。特别是当求解并没有产生满意的结果时，决策者不得不对其满意度的表现形式、要求进行调整。C. Mohan 等提出了一种基于参考隶属度的满意度要求调整规则。当需要调整满意度函数、或没有指定参考隶属度时，应结合满意度的刻画过程对偏好参数进行调整。

## 7.1.2 分销应急决策模型

### 1. 问题描述

本书研究由一个制造商和  $M$  个零售商组成的两层供应链系统，零售商面临确定性需求。制造商生产并向零售商销售一种产品，单位生产成本为  $C$ 。它在 0 时刻接收到各零售商的订单，从制造商到各零售商的运输时间为和零售商发生的相关成本，如其所承担的运输成本等为已知。各零售商的销售周期均开始于第  $T_s$  天，结束于第  $T_e$  天末。制造商接收到订单后，制定生产与物流计划，组织并开始生产。由于原料供应、机器故障等突发事

件, 导致第  $T_l$  ( $T_l \geq T_s$ ) 天到第  $T_R$  天生产中断。假设:

(1) 制造商的生产率是一个常数。虽然制造商有可能在生产恢复后提高生产率, 但这并不影响问题的本质, 具体原因将在 7.1.2 节“分销应急决策模型”部分作进一步解释。

(2) 不失一般性, 假设制造商对零售商的供应开始于生产中断之后。如果在生产中断之前, 供应商已经按照事前确定的销售计划, 对某些零售商进行了足额产品供应, 那么在生产中断之后, 进行响应性决策时, 只要将这些零售商排除在外即可。

制造商的销售对象(零售商)、对各零售商的销售量和发货时间构成了完整的分销策略, 该策略将表明在何时间、对哪个零售商、进行何种程度的供应。理想的分销策略应该做到: ①产品数量的合理分配。由于生产中断, 制造商能够提供的产品数量可能不能满足所有订单。将有限产品向某个零售商集中, 在提高该零售商获利的同时将引起其他零售商获利水平的下降, 在降低该零售商缺货成本的同时将引起其他零售商缺货成本的上升, 因此存在产品的合理分配问题。②发货时间的合理选择。制造商可能希望推迟供货, 因为这样可以增加供给能力, 但运输时间和销售期的存在使其不能无限制地推迟供应。

## 2. 分销决策模型目标函数

供应链管理的本质在于将供应链视为一个整体, 以全局优化的方式提升整个供应链的竞争优势, 进而保证各成员企业的获利水平。从整个供应链系统的角度出发, 其所追求的目标有两个: 一是获利水平向极大化方向发展, 二是缺货成本向极小化方向发展。

(1) 获利水平向极大化方向发展, 即销售收入与销售成本之间的差  $PF$  向极大化方向发展。这里引入“供给顺序”的概念, 供给顺序是指对各家

零售商发运产品的时间顺序。对于包含  $M$  家零售商的供应链，供给顺序共有  $M!$  种。以  $M=3$  为例，供应链中有 3 家零售商  $R_1, R_2, R_3$ ，则供给顺序有  $3!=6$  种，供给顺序集合为：

$$\Phi = \{R_1, R_2, R_3; R_1, R_3, R_2; R_2, R_1, R_3; R_2, R_3, R_1; R_3, R_1, R_2; R_3, R_2, R_1\}$$

记  $R_{jk}$  ( $j=1, 2, \dots, M; k=1, 2, \dots, M!$ ) 为第  $k$  个供给顺序下的第  $j$  个零售商，其发生的相关成本，如运输成本等为  $C_{jk}$ 。在  $R_{jk}$  所面临的市场上，产品销售价格为  $P_{jk}$ 。  $q_{jk}$  为制造商向  $R_{jk}$  提供的产品数量。从供应链系统角度看，由于制造商与零售商之间的转移支付与决策并不相关，因此分销决策模型的第一个目标为：

$$\text{Max PF} = \sum_{j=1}^M (P_{jk} - C - C_{jk}) q_{jk} \quad (\forall k) \quad (7-3)$$

(2) 缺货成本向极小化方向发展。缺货成本是指在生产经营活动中，由于产品未能充分满足市场需求而引起的机会损失。缺货不仅失去了当前的销售机会，而且可能导致未来盈利机会的丧失。缺货成本实质上是机会成本，它虽然不构成企业的实际支出，却对企业形象和声誉产生了负面影响，有可能导致消费者购买行为转向，因而从长期角度看，将影响到供应链的利益。缺货成本在一定程度上反映了客户满意程度，缺货成本越高，客户满意程度越低。在客户需求主导的市场竞争中，追求缺货成本极小化，有助于提高客户满意水平，体现了通过供应商到零售商的整个供应链的努力，为客户创造价值的供应链管理理念。

记  $R_{jk}$  面对的市场需求量为  $D_{jk}$ ，零售商在整个销售期内没有满足需求发生单位缺货成本  $S_{jk}$ ，则分销决策模型的第二目标为供应链系统的缺货成本 SA 向极小化方向发展，即

$$\text{Min SA} = \sum_{j=1}^M (D_{jk} - q_{jk}) S_{jk} \quad (\forall k) \quad (7-4)$$

很多学者将这两个目标合并起来, 追求 (PF-SA) 最大化, 如 Gérard P. Cachon 等<sup>[139]</sup>。但是在企业实践中, 考虑到缺货的重要性, 决策者往往并不仅仅关注 (PF-SA), 对缺货成本 SA 也很关注, 因此本书将获利水平和缺货成本作为两个目标分别加以控制。

### 3. 分销决策模型约束条件

模型中的约束条件可以分为资源约束、时间约束、理性约束和其他约束四类。

(1) 资源约束: 由于生产中断, 零售商的订单可能无法完全满足。记制造商向零售商  $R_{jk}$  发运产品的时间为  $t_{jk}$ 。在每一个供货时间点  $t_{jk}$  上, 可提供的产品不超过期初存货量  $Q_s$ , 加上 0 时刻到  $t_{jk}$  这段时间的生产量  $v(T_l + \max\{t_{jk} - T_R, 0\})$ , 再减去在前  $(j-1)$  个供货时间点上已经销售给零售商的数量  $\sum_{d=1}^{j-1} q_{dk}$ , 即

$$q_{jk} \leq Q_s + v(T_l + \max\{t_{jk} - T_R, 0\}) - \sum_{d=1}^{j-1} q_{dk} \quad (7-5)$$

式中,  $v$  为生产率。这里利用了假设 (1)。事实上, 若制造商在生产恢复后将生产率提高至一个新的常数, 只会影响式 (7-5) 中不等号右侧第 2 项的表现形式, 并不影响问题本质。

(2) 时间约束: 在生产中断的情况下, 制造商为了增加供应能力, 可能希望延迟供应, 但是由于销售期的存在, 使得供货时间点不能太迟, 否则就会错过销售期, 并且供货时间点之间也有一定的顺序依赖关系。记  $TR_{jk}$  为从制造商到零售商  $R_{jk}$  的运输时间, 时间约束如下:

$$t_{jk} \leq T_E - TR_{jk} \quad (7-6)$$

$$t_{ik} \leq t_{(i+1)k} \quad i = 1, 2, \dots, M-1 \quad (7-7)$$

(3) 理性约束：制造商向各家零售商供应的存货数量不高于其订货量  $D_{jk}$ ，即

$$0 \leq q_{jk} \leq D_{jk} \quad (7-8)$$

(4) 其他约束。根据 7.1.2 部分的假设条件 (2)，有约束

$$t_{1k} \geq T_l \quad (7-9)$$

此外，决策者可能希望根据自身要求添加其他约束条件，如出于某些考虑，要求向某些地区投放的产品数量不少于一定的限额。

### 7.1.3 约束满意决策方法

#### 1. 应用满意决策方法的合理性分析

H.A. Simon 认为由于环境的不确定性、信息不完全性、不完全偏好体系和有限的计算能力等因素，使完全理性假设并不完全符合客观实际情况，因而最优解在复杂问题中往往难以获得<sup>[140]</sup>。本书引入了满意决策技术，其原因如下：

(1) 生产中断条件下的分销决策是一个多目标问题，因此问题的解只能是在决策者一定偏好下做出的满意解，建立在令决策者满意的基础上。获利水平与缺货成本这两个目标之间可能存在一定的冲突，往往不能同时实现最优。决策者改进某一目标，不得不在一定程度上对另一目标做出让步。因此，最终的决策结果必然是一个满意决策，而非最优决策。

(2) 不同决策者有不同的偏好体系。同样的获利水平或缺货成本水平，有的决策者认为是可以接受的，有的认为是不可接受的。在企业实践中，

这种偏好贯穿于决策过程中,但传统的最优化方法并不支持决策者偏好的体现。

采用满意决策方法,按照文献[138]给出的方法刻画决策者的满意度,具体方法为:记分销决策模型中约束条件构成约束集为 $\Theta$ ,获利水平PF和缺货成本SA在约束集 $\Theta$ 上的最大值和最小值分别为 $PF_{\max}, PF_{\min}, SA_{\max}, SA_{\min}$ ;指定各目标在区间 $[PF_{\max}, PF_{\min}], [SA_{\max}, SA_{\min}]$ 上的满意度函数 $\mu_{\overline{PF}}(PF), \mu_{\overline{SA}}(SA)$ 。例如,记 $PF_L, PF_U, SA_L, SA_U$ 分别为获利水平与缺货成本的满意度函数变动部分的下界和上界,可以采用一种梯形满意度函数:

$$\mu_{\overline{PF}}(PF) = \begin{cases} 0 & PF_{\min} \leq PF < PF_L \\ \frac{PF - PF_L}{PF_U - PF_L} & PF_L \leq PF \leq PF_U \\ 1 & PF_U < PF \leq PF_{\max} \end{cases}$$

$$\mu_{\overline{SA}}(SA) = \begin{cases} 1 & SA_{\min} \leq SA < SA_L \\ \frac{SA_U - SA}{SA_U - SA_L} & SA_L \leq SA \leq SA_U \\ 0 & SA_U < SA \leq SA_{\max} \end{cases}$$

## 2. 满意决策规则

由于生产中断条件下分销决策模型的多目标之间存在关联,结合不同决策者不同的决策偏好,本书提出了三种决策规则。

规则 1: 在获利水平达到决策者满意的基础上,追求缺货成本满意度最高,如式(7-10)所示;

规则 2: 在缺货成本达到决策者满意的基础上,追求获利水平满意度最高,如式(7-11)所示;

规则 3: 在获利水平和缺货成本均实现决策者满意的基础上, 按一定方式寻优, 如综合满意度水平 SS 达到最高, 如式 (7-10) 所示。

$$\begin{aligned} \max \quad & \mu_{\widetilde{SA}}(SA) \\ \text{s.t.} \quad & \mu_{\widetilde{PF}}(PF) \geq \mu_{PF} \end{aligned} \quad (7-10)$$

$$\begin{aligned} \max \quad & \mu_{\widetilde{PF}}(PF) \\ \text{s.t.} \quad & \mu_{\widetilde{SA}}(SA) \geq \mu_{SA} \end{aligned} \quad (7-11)$$

$$\begin{aligned} \max \quad & SS = \alpha \mu_{\widetilde{PF}}(PF) + (1 - \alpha) \mu_{\widetilde{SA}}(SA) \\ \text{s.t.} \quad & \mu_{\widetilde{PF}}(PF) \geq \mu_{PF} \\ & \mu_{\widetilde{SA}}(SA) \geq \mu_{SA} \end{aligned} \quad (7-12)$$

式 (7-8) ~ 式 (7-10) 均省略了约束集  $\Theta$ ,  $\mu_{PF}$  和  $\mu_{SA}$  分别为决策者对获利水平和缺货成本两个目标的满意度要求,  $\alpha$  为对获利水平目标的权重。

### 3. 约束满意算法

以规则 3 为例, 设计了约束满意算法。规则 1 和规则 2 所对应的算法可以进行类似研究。由式 (7-12) 和约束集  $\Theta$  构成的约束满意优化模型中, 决策变量为  $k$ 、 $q_{jk}$  和  $t_{jk}$ 。算法步骤如下:

Step1 分析可能的供给顺序, 共有  $M!$  种;

Step2  $k = 1, SS_{\max} = 0, \text{Mark} = 0$ ;

Step3 如果  $k > M!$ , 转 Step7, 否则转下步;

Step4 取第  $k$  种零售商补给顺序, 并进行相应参数初始化;

Step5 对确定的  $k$ , 若由式 (7-10) 和约束集  $\Theta$  构成的约束满意规划模型有解, 且目标函数最优值  $SS^* > SS_{\max}$ , 那么  $k^* = k, q_j^* = q_{jk}, t_j^* = t_{jk}$ ,  $\text{Mark} = 1, SS_{\max} = SS^*$ , 转 Step7, 否则直接转下步;

Step6  $k = k + 1$ , 转 Step3;

Step7 输出  $k^*$ 、 $q_j^*$ 、 $t_j^*$ 、 $SS_{\max}$ , Mark, 结束。

当输出 Mark = 0 时, 表示算法没有产生可行解, 意味着决策者对两个目标的要求的满意度过高, 应适当放宽要求, 即降低  $\mu_{PF}$  和  $\mu_{SA}$ 。

### 7.1.4 算例

为说明约束满意方法的应用, 考虑一个从企业实际抽象出来的简化案例。供应链由 1 个制造商和 4 个零售商组成, 由于地理位置分散, 零售商面临的市场不尽相同, 基本参数如表 7-1 所示。

表 7-1 分布式供应链基本参数

项目/零售商	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$
产品零售价 (元)	80	50	65	75
单位缺货成本 (元)	10	15	8	12
订货量 (件)	1100	1400	1500	1000
运输时间 (天)	4	2	3	1
单位产品其他成本 (元)	8	4	6	2

产品的单位制造成本为 35 元, 制造商的期初库存为 200 件, 在 0 时刻, 零售商向制造商已经发出订单, 本轮销售周期将在 9 天后开始, 持续 2 天。制造商确定的生产率为 600 件/天。但在第 2 天, 由于突发事件导致生产被迫中断, 将持续 4 天。制造商不得不重新决定分销计划, 以最大限度地减少停工带来的损失。

首先, 建立形如式 (7-3) ~ 式 (7-9) 的分销决策模型, 求解分别由式 (7-3)、式 (7-4) 与约束集  $\Theta$  构成的两个规划问题。解得获利水平最高为 116900 元, 最低为 0 元, 缺货成本的最高水平为 56000 元, 最低为 9600 元。

其次, 决策者 (制造商) 拟在获利水平满意度达到 0.8, 缺货成本满意



度达到 0.95 的范围内，寻求综合满意度最高，即采用规则 3 进行决策。决策者指定的满意度函数为

$$\mu_{PF}(PF) = \begin{cases} 0 & 0 \leq PF < 95000 \\ \frac{PF - 95000}{20000} & 95000 \leq PF \leq 115000 \\ 1 & 115000 < PF \leq 116900 \end{cases}$$
$$\mu_{SA}(SA) = \begin{cases} 1 & 9600 \leq SA < 15000 \\ \frac{55000 - SA}{40000} & 15000 \leq SA \leq 55000 \\ 0 & 55000 < SA \leq 56000 \end{cases}$$

取  $\alpha = 0.5$ ，采用 7.1.3 节“约束满意决策方法”部分给出的算法，求得问题的满意优化解，如表 7-2 所示。

表 7-2 分销满意优化解

供货点（时间）	5.5	7.7564	8.3333	10
供货对象（零售商）	$R_1$	$R_3$	$R_2$	$R_4$
供货量	1100	1353.8	346.15	1000

按照此方案，供应链系统的获利水平为 115000，满意度水平为 1，缺货成本为 16977，满意度水平为 0.9506，综合满意度水平为 0.9573。将该方案与其他决策产生的方案进行比较：

（1）制造商单方面取消所有销售合同。由于突发事件往往属于不可抗力，使得制造商取消销售合同有可能并不触犯法律。在本书研究的案例中，如果制造商取消销售合同，供应链系统将出现亏损，缺货成本达到极大值 56000 元，客户需求根本没有得到满足。采用本书的方法能够有效提高供应链系统的获利水平，并降低缺货成本。降低缺货成本在一定程度上表明

客户需求得到更好的满足，这正体现了供应链管理的目标。

(2) 制造商不按照满意原则进行决策，而是追求  $(PF-SA)$  实现最大，这是在许多文献中常见的方法。采用此方法，获得的最优解为：分别在时间点 5.5、8、8.3333、10 上向  $R_1$ 、 $R_3$ 、 $R_2$ 、 $R_4$  销售产品 1100、1500、200、1000 件，供应链系统获利水平为 116900 元，缺货成本为 18000 元（满意度仅为 0.925，没有达到决策者期望的满意度水平）， $PF-SA=98900$  元。按照本书提出的方法， $PF-SA=98023$  元，确实小于 98900 元，但缺货成本仅为 16977 元， $(PF-SA)$  虽然减少了 1.6253%，但缺货成本却降低了 5.6833%。在如今以市场为导向的竞争中，客户忠诚、客户满意程度等越来越引起决策者的重视，缺货无疑会影响到企业的形象和地位，进一步削弱其竞争优势。显然，当决策者对缺货水平有较多关注的时候，本书采用的分销决策方法更合理、有效。

由于机器故障、原料供应不足等突发情况，企业面临着生产中断的风险。关于生产中断突发事件条件下的供应链应急决策，目前并未给予足够的重视。SARS 等突发事件后，企业逐渐开始关心这一问题。本案例研究了制造商生产中断下的分销决策问题，构建了分销决策多目标多约束模型，提出了基于满意决策理论的约束满意方法，给出了决策规则和满意解搜索算法。本案例将获利水平与缺货成本作为两个目标分别加以控制，这一思路特别适用于当今以市场为导向的竞争环境。研究表明，对生产中断的科学响应，有助于避免利润损失和缺货成本激增。与取消销售合同、追求获利水平与缺货成本的差最大这两种决策方法相比较，本案例提出的决策方法具有一定的优越性。本案例研究从联合优化的角度建模，使供应链系统实现了满意优化。这种寻求系统利益优化的决策方法可能影响个别零售商的利益，因此需要进一步研究利益在各成员间的分配问题。

## 7.2 复杂电网中的连锁故障应急研究

---

随着电力系统负荷的迅猛增长和互联程度的不断加深，大电网已成为世界上最复杂的网络之一。结构复杂、规模庞大等特征导致大电网系统的不确定性急剧增加，偶然的局部故障都会波及全网并引发大面积停电<sup>[112]</sup>。近年来，世界各地发生了多起由自然灾害导致的大电网连锁故障事故，如2003年波及5000万人口的美加“8·14”大停电和影响6亿人生活的2012年印度大停电，都对社会经济和国民生活造成了巨大的损失。自然灾害是造成此类电网故障的直接和主要诱因，它们具有的偶发性、广泛波及性、灾害信息复杂性等特点给电网故障的预防和恢复带来了极大的困难。因此，研究自然灾害下大电网连锁故障的发生机制，保障电力系统快速识别出故障发生、扩散的关键节点、状态和可能路径，并针对电网中的关键节点建立控制策略和恢复措施已成为电网安全研究领域的热点和难点问题<sup>[113, 114]</sup>。国内外历次大停电事故表明，电力系统停电事故多由连锁故障所致<sup>[115]</sup>。国内外学者从以下两个角度提出了多种分析方法和数学模型来研究电网连锁故障的发生、发展机理及其表现形式：一是建立在模拟电网物理过程基础上的以模式搜索为主的分析方法，主要通过对系统中的元器件、保护装置等设备和初始故障、负荷变化等事件进行时域仿真，然后搜索出引发电网连锁故障的模式<sup>[116, 117]</sup>，提出预防措施。这种分析方法对简单故障模拟起到了很好的作用，但在大规模电网故障分析时容易产生组合爆炸问题。并且，由于注重各元件的个体动态特性，在分析电力系统连锁故障和大停电机理等系统动态行为方面很难揭示系统整体的动态行为特征。二是简化物

理过程、基于复杂网络的宏观研究。复杂性理论作为系统整体论分析方法,有助于从系统角度自顶向下分析电网连锁故障的全局性质。现有研究已证明电力网络符合复杂网络中的小世界网络模型<sup>[118]</sup>和无标度网络模型<sup>[119]</sup>,并获得了一些扩展性研究成果。例如,文献[120]提出了邻域网络模型,这种网络模型通过参数变化可以使节点获得从指数分布到幂律分布的过渡,研究成果有望更好地近似现实世界电网的演化过程;Yook 等人<sup>[121]</sup>提出了复杂加权网络模型,即在复杂网络中不同节点间作用的强度是不同的,通过引入边的权值更好地反映了网络的耦合程度,复杂加权网络能够更贴切地描述实际复杂系统,提供了人们深入探索实际复杂系统特性和复杂行为的一个数学工具,也拓展了复杂网络在实际中的应用;汪晓帆等<sup>[122]</sup>认为,大多数实际世界的复杂网络是时变的,不同的边不但具有不同的耦合强度,而且还是时变的,从而提出了一个广义时变的复杂动力网络模型。该模型在研究复杂网络动力学行为上获得了广泛应用。这些模型都是将复杂网络的电力系统抽象为网络,并从网络的角度来研究电网本身的拓扑结构对故障传播的影响,其本质是研究宏观复杂系统的结构脆弱性问题及其对于故障传播的作用。但是,这些模型分析方法所考虑的物理过程是简化之后的,与电网的实际运行情况存在较大差距,因而对于电网结构脆弱性的反映仍处于初级阶段<sup>[123]</sup>。综上所述,目前关于电网连锁故障的分析研究成果离预防控制实用化还有一定差距。若能结合电网实际的电气参数,如支路阻抗、潮流,节点注入功率、节点动态方程等,利用加权网络和时变网络对电力网络进行分析将是电网复杂性研究的一个方向。基于该思想,本章将情境重构模型与模拟物理过程的模式搜索相结合,首先分析了大停电事故的阶段演化过程,然后根据具体的电力系统停电事故的特征构造控制策略来缩小搜索空间,针对电网的实际运行条件确定可能的故障传播序列,提出预

防连锁故障大停电的整体和局部恢复控制策略以延迟系统进入自组织临界状态，从而有效防止连锁故障的发生。

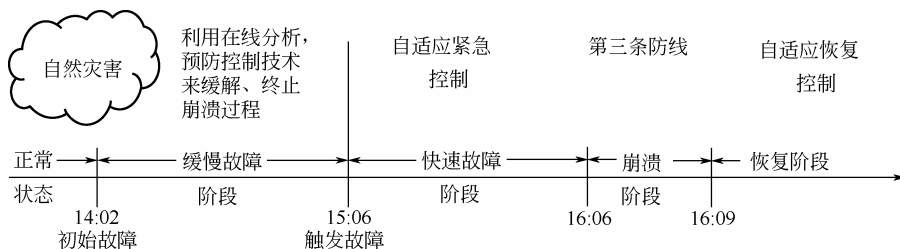
### 7.2.1 电网连锁故障的演化分析

首先选取三个典型的电网灾害案例：2003 年美加大停电，2005 年 5 月 25 日莫斯科大停电，2009 年 11 月 10 日巴西大停电。国内外的实例都表明，自然灾害引发的大电网连锁故障的一般规律为：在大停电发生前，电网往往在不安全状态下运行（如高温导致的线路负荷高峰等）；随着自然灾害持续性破坏的深入或爆发，导致电网内部一个或几个元件发生故障，称为初始故障，如一个或几个元件发生扰动，或联络线路、变压器、母线等发生的短路故障，也可能是联络线的短路操作、发电机组与系统的解列、大负荷的投切和变电站内开关的投切操作等。初始故障的发生标志着系统的安全性被破坏，随后在各种因素耦合的连锁效应作用下逐步发展而成，是一种小概率高风险事件。当初始故障发生后，系统安全性削弱，但通常这类扰动还不足以引起系统大范围崩溃，是一个相对缓慢的破坏过程，表现为缓慢的故障破坏。在这一破坏过程中，由于缺乏自适应的预防控制技术，系统进入快速连锁故障阶段。由缓慢故障阶段导致系统进入快速故障阶段的故障称为触发故障。从已发生的各种大停电事故的发展过程中可以看到，初始扰动后的序列事件是引起连锁故障的重要原因。在快速故障阶段，若系统无法通过自适应的紧急控制技术进行调整，则系统将进入连锁故障的崩溃阶段。电网停电事故演化过程如图 7-3 所示。

在美加“8·14”大停电事故中，演化阶段过程如下：

- （1）气象灾害：事故发生前该地域正值高温，电网负荷部分超载。
- （2）14：02：00，初始故障发生：俄亥俄州 Stuart 到 Atlanta 的一条

345kV 联络线因局部放电跳闸。



◎ 图 7-3 电网停电事故演化过程

(3) 初始故障后的缓慢破坏过程持续的 63min 内, 有 5 条线路相继开断, 期间分别有 22min、9min、5min、29min 可供决策并实施控制, 以避免下一个开断。由于离线制定的调度规程不可能考虑完整的 N-2 准则, 更不用说 N-3 等准则, 因此除了快速可靠的继电保护以外, 还必须依靠在线稳定分析和预防控制。

(4) 15: 05: 41, 俄亥俄州 Chamberlain 到 Harding 的一条 345kV 联络线因过负荷跳闸。

(5) 15: 41: 33, 俄亥俄州 Star 到 South Canton 的一条 345kV 联络线因过负荷跳闸。

(6) 15: 45: 33, 俄亥俄州 Tidd 到 Canton Centerl 的一条 345kV 联络线因过负荷跳闸, 58s 后重投, 导致 Canton Centerl 站内一台 345kV/138kV 变压器停运。

(7) 16: 06: 03, 俄亥俄州 Sammis 到 Star 的一条 345kV 联络线因过负荷跳闸。

(8) 此后系统进入快速连锁故障阶段, 其后不到 5min 又有多条线路相继故障并退出运行, 导致系统完全崩溃<sup>[124]</sup>。

综合以上演化阶段过程得出自然灾害下大电网连锁故障的行为特征如下：

(1) 极端的气象灾害在无法预测的情况下，对电网运行产生隐患。首先，恶劣的天气是影响大电网连锁故障的主要因素，雨雪、雷击、覆冰等天气将会严重恶化电力系统元件的运行环境，进而引发元件故障退出运行。其次，电网调度员的管理不善和运行维护人员的操作不当等人为因素也有可能推动连锁故障的传播。

(2) 大电网连锁故障由初始故障开始，从初始故障到系统完全崩溃往往是一个时间较长的过程。

(3) 在连锁故障的整个演变过程中，系统在连续故障阶段时仍处于一种可控的状态，而且相继故障间的事件间隔较长。

### 7.2.2 基于节点度有限的电网连锁故障模型

电网连锁故障的成因比较复杂，简单地说其发生机理是：电网正常运行时每个元件因过负荷而导致故障发生时改变潮流的平衡并引起负荷在其他节点上的重新分配，将多余的负荷转移加载到其他元件上；如果这些原来正常工作的元件不能处理多余的负荷就会引起新一次的负荷重新分配，从而引发连锁的过负荷故障，并最终导致网络的大面积瘫痪和大规模停电事故的发生。由上述机理可见，连锁故障模型需要解决三个问题：节点上初始负荷的定义，节点故障后负荷重新分配的机制或动力学过程，节点能力与初始负荷之间的关联。

当灾害事件爆发后，有可能会引起次生事件的发生。令因灾害事件引起的次生事件集合为： $A = \{F(m_1), F(m_2), \dots, F(m_n)\}$ ，其中  $F(m_i) = E(R_1, R_2, \dots, \omega_1 e_1, \omega_2 e_2, \dots)$ 。把引发次生事件的灾害事件也作为相关影响因素，

而这里  $E$  函数则代表相关因素综合影响函数,  $R_i$  为单一灾害事件  $i$  的演化函数, 它对  $E$  函数及其  $E$  函数中其他因素都有很大的影响。  $E$  函数中的参数  $e_i$ , 代表的是对次生事件的爆发起到不同程度影响的相关因素, 例如, 一些媒体、谣言、通信网络、报纸、电视、广播、政府网站等在突发事件的演化过程中所扮演的角色。  $E$  函数中的  $\omega_i$  为  $e_i$  影响因素对次生事件的影响权重。

对于  $E$  函数中  $R_i$  函数的分析:  $R_i$  代表单一灾害事件  $i$  的演化函数, 它的值直接影响相关联的次生事件的爆发。对于每个单一突发事件  $i$ , 存在影响函数阈值  $R_{it}$ , 即单一突发事件的影响效应达到阈值时, 将直接触发次生事件的爆发。当  $R_i < R_{it}$  时, 单一突发事件对次生事件的影响具有模糊性。

为了更好地控制灾害事件的蔓延, 减轻灾害损失, 应切断灾害事件之间连锁反应的链条。而要达到这样的目的, 必须深入探索突发事件之间的演化规律, 界定引发次生事件的相关影响因素, 并严格量化影响因素权值与比重。为了求解电网连锁故障模型, 引入人工智能状态空间搜索理论, 建立智能化的电网连锁反应的灾害演化状态空间, 将连锁故障反应方案转化为状态空间图中从初始状态至目标状态的一条路径。

为提高外部自然灾害环境下, 控制策略搜索的快速性和有效性, 电网安全防御系统根据电网运行状态和外部运行环境, 自动识别电网运行状态, 并依据电网状态和外部环境变化特征, 甄别出预防控制的候选控制措施集, 包括各类控制的控制地点、控制对象和调节控制的范围、控制代价、解决的安全稳定问题及针对的预想故障。本案例主要考虑实现故障的全面搜索, 尽可能综合考虑各种初始故障的可能性和继电保护动作的不确定性, 以及搜索结果的合理性。该模式按照初始故障的排序决策矩阵及排序计算方法, 通过不断循环来搜索起点的决策。在搜索的过程中通过数值计算程序交替

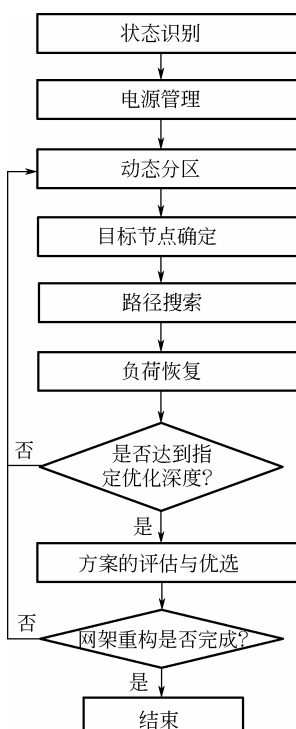


进行潮流和稳定计算，任何一次初始故障及支路断开之后，都进行相应的系统情况判别，若系统失稳则停止当前的搜索；若系统稳定则依据潮流的计算结果来判断下一个可能的支路开断，依此类推，直至遇到结束条件而停止当前的搜索循环，然后进入下一次搜索循环中。

在控制策略上将采取 2 层优化框架，按“分区独立优化、协调动态分区”的方式自适应优化，克服离线预案依据的场景及措施优先顺序不变的缺点。按分区独立优化、协调动态分区的 2 层优化框架，完成各分区网架的连通，然后改善系统发电、输电充裕度，以恢复剩余停电负荷。如果网架连通性未遭破坏，则可直接进入后一阶段。该框架的下层在上层的指导下，并发地进行各分区的独立优化。上层在对下层监控的基础上，合理利用内部和外部的各种启动能力，将待恢复的电网动态地分区，协调分区间网架重构并改善发电和输电充裕度。该框架将专家经验和系统运行规程表示成规则，针对系统当时状态搜索恢复方案，调用相应数值仿真程序校验及经济评估。在线跟踪恢复过程，动态修正恢复措施。决策优化中考虑了相继故障、控制参数及控制后果等方面的不确定性。

网架重构阶段的任务包括动态分区和并发恢复。按一定优化深度搜索可行方案，按指标评估方案，并发地优化 **top-down** 策略和 **bottom-up** 策略。然后各分区按各自的最优方案恢复，上层则动态监视各分区的恢复进程，选择并优化并网的通道和时机。分区内的优化与协调优化并行进行，由于优化深度的限制，需要不断地优化。**top-down** 策略还要协调备用容量，混合策略还要协调动态分区、内部/外部电源。

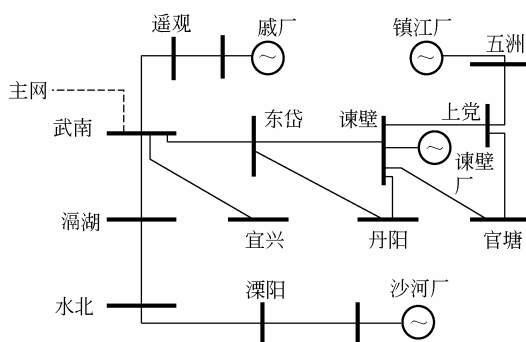
单个分区的网架重构流程如图 7-4 所示。如果不确定因素较少（如在孤立子系统中），优化深度可以取得大些，甚至不需要多步骤优化。



◎ 图 7-4 单个分区的网架重构流程

分区间的协调优化由孤立分区中的事件触发，判断孤立分区之间并网的条件，以及孤立分区并入主网的条件，包括并网通道、操作后的潮流、稳定性、各种不等式约束等。然后调用安全分析模块评估风险，选择并网风险最小的通道。如果并网后的净收益提高，则做出并网决策。为了有效恢复由于可用联网发电容量不够或电网阻塞而仍然无法供电的负荷，需要优化工况的调整。期间需要动态地考虑实际负荷变化和机组并网的不确定性，根据执行后系统的工况逐步优化。充裕度改善阶段先恢复尚待恢复的负荷，在分区内连通的基础上恢复其余线路。在此期间，尚待恢复的发电





◎ 图 7-6 常镇子系统的主干网接线图

表 7-3 给出了并列前两个子系统的节点电压，表 7-4 给出了分别按三种方案并列后的节点电压。根据当前可用的发电、输电容量，并列前后负荷的恢复计划相同，因此根据风险变化决定是否并列运行。采用相同的故障集，其中的故障取为线路某端三相短路后 0.12s 切除线路，穷尽方式考核系统稳定性。仿真持续时间为 105s。

从表 7-5、表 7-6 所示的仿真结果可以看出：

(1) 由于并列运行后没有增加负荷收益或减小系统的失稳风险，三种并列方式均没有带来明显的经济效益，因此可以向调度人员推荐两种方案：①不并列运行，仍然独立恢复；②从新泾—五洲线路并列运行。

(2) 从仿真中可以看出，不适当的并列通道、并列时机反而会恶化系统的稳定状况，不利于系统的恢复。

(3) 如果并列后可以获得更大的负荷收益，则可以承受较大的风险。例如，有两个恢复中的子系统，一个重要负荷集中但发电不足，另一个发电容量充裕但缺少重要负荷。此时两个子系统并列无疑可以加速重要负荷的恢复进程，并列后的运行风险可能增加，但只要小于增加的负荷收益，

那么并列运行就是适宜的。

(4) 该方法能够有效地支持子系统恢复并列运行的相关决策，并且同样适用于是否闭环和闭环点的选择的决策过程。

表 7-3 并列前两个子系统的节点电压

母线名	电压幅值 (kV)	电压相角 (°)	母线名	电压幅值 (kV)	电压相角 (°)
常熟	222.6	-2.22	芙蓉	223.9	-6.32
斗山	223.8	-6.06	暨阳	225.2	-4.74
福前	222.6	-7.78	丹阳	227.4	-6.37
港区	223.1	-7.25	东岱	226.4	-8.38
华能苏州	224.6	5.63	官塘	226.9	-6.09
胶山	223.4	-6.64	戚墅堰	229.4	-8.05
利港	227	-2.92	上党	227.6	-4.58
七海坝	222	-7.69	水北	222.3	-11.13
石塘	224.1	-6.15	武南	226.7	-9.13
塘头	223.8	-6.44	五洲	229.9	-2.83
望亭	223.5	-6.44	宜兴	219.1	-10.95
夏港厂	225.4	-4.5	高湖	225.4	-9.89
新泾	223	2.47	谏壁	227.8	-4.84
张家港	223.1	-7.48	溧阳	217.2	-13.06

表 7-4 分别按三种方案并列后的节点电压

母线名	新泾—五洲		武南—斗山		两条路径并列	
	电压幅值 (kV)	电压相角 (°)	电压幅值 (kV)	电压相角 (°)	电压幅值 (kV)	电压相角 (°)
遥观	227.5	-7.61	228	-6.97	227.7	-7.15
常熟	226.2	-4.52	225.1	-3.51	226.2	-4.61
丹阳	225.7	-5.33	226.8	-5.19	225.9	-5.06
东岱	224.8	-7.38	225.6	-6.9	225.1	-6.98

续表

母线名	新泾—五洲		武南—斗山		两条路径并列	
	电压幅值 (kV)	电压相角 (°)	电压幅值 (kV)	电压相角 (°)	电压幅值 (kV)	电压相角 (°)
斗山	225.6	-7.36	225.5	-7.24	225.5	-7.59
福前	224.7	-9.33	224.3	-8.93	224.6	-9.51
港区	225.1	-8.72	224.8	-8.41	225	-8.92
官塘	225	-3.91	226.4	-4.12	225.1	-3.73
华能苏州	227.6	2.39	226.4	4.23	227.7	2.43
胶山	225.5	-7.75	225.4	-7.63	225.4	-7.98
利港	227.7	-3.71	227.7	-3.64	227.6	-3.85
七海坝	224.4	-9.31	223.9	-8.85	224.3	-9.48
上党	225.5	-3.27	227.1	-3.61	225.6	-3.11
石塘	225.5	-7.25	225.5	-7.15	225.5	-7.44
水北	220.8	-10.17	221.4	-9.52	221.1	-9.71
塘头	225.3	-7.6	225.2	-7.49	225.2	-7.81
望亭	225.6	-7.75	225.5	-7.63	225.5	-7.98
武南	225.2	-8.14	225.8	-7.5	225.5	-7.68
五洲	227.1	-1.01	229.3	-1.85	227.2	-0.93
夏港厂	226.8	-5.91	226.7	-5.69	226.8	-6.12
新泾	226.7	-0.71	225.1	1.1	226.7	-0.68
宜兴	217.6	-9.99	218.2	-9.33	217.9	-9.52
张家港	225.1	-9.02	224.7	-8.63	225	-9.2
磊湖	223.9	-8.92	224.5	-8.27	224.2	-8.46
谏壁	226	-3.77	227.3	-3.88	226.2	-3.58
芙蓉	225.6	-7.71	225.4	-7.49	225.6	-7.92
溧阳	215.6	-12.13	216.3	-11.47	215.9	-11.66
暨阳	226.4	-5.78	226.4	-5.69	226.4	-5.97

表 7-5 并列前两个子系统的风险值

子系统	失稳故障	失稳风险（万元）
常镇子系统	（10）	4
苏锡子系统	无	0

表 7-6 并列后系统的风险值

路径	失稳故障	失稳风险（万元）
新泾—五洲	无	0
武南—斗山	（21，22，32，33）	21
两条路径并列	（20，21，22，23）	18

### 7.3 2008 年冰雪灾害应对案例

就复杂灾害中的电网破坏致灾而言，2008 年我国南方冰雪灾害尤为典型。2008 年我国南方遭受罕见暴风雪的袭击，波及 14 个省，直接经济损失近 30 亿美元。其中，西南、华中、华南、华东地区的电网运行遭受重大破坏，许多地区基础设施损坏严重，其中又以电力基础设施的损失最为严重。灾害共造成超过 36000 条 10 kV 及以上电力线路、2000 多座 35kV 及以上变电站的群发性停运。大面积停电又引发了铁路停运、城市停水、通信中断、紧急救助队伍和物资无法及时抵达等基础设施服务的全面瘫痪。在江苏，2008 年 1 月 25 日至 29 日，省内淮河以南地区遭受了历史罕见的区域性暴雪袭击，南京等地的降雪量超过 50cm，江苏电网部分地区电力供应紧张，多个断面超稳定限额运行。在江西省，情况更加艰难危急。在 2008 年 1 月 12 日至 2 月 1 日期间，出现了 50 年未遇的持续二十多天

的低温、雨雪冰冻恶劣天气，先后承受了四轮冰雪的袭击。电力设施特别是输电线路覆冰非常严重，致使输电线路发生大范围的倒塔、导地线断裂而被迫停运，受灾面积超过 80%，江西电网遭遇有史以来最严重的破坏。500kV 网架基本瘫痪，累计发生线路倒塔 116 基、断线 116 处，19 条 500kV 线路中有 17 条先后停运，9 座变电站中有 2 座停运；220kV 网架受到严重破坏，一度面临瓦解的严峻形势，累计发生 220kV 线路倒塔 142 基、断线 548 处，181 条 220kV 线路中有 57 条先后停运，共停运变电站 35 座；110kV 电网损毁严重，累计发生 110kV 线路倒杆 515 基、断线 996 处，停运变电站 109 座；35kV 及 10kV 线路累计倒杆 54817 基、断线 54374 处。通信光缆损毁 420km。城市配电线路、电能计量装置也有少量损坏。江西电网先后 5 次与华中主网解列，电网一度解列成三片运行。赣州、抚州、吉安、萍乡地区灾情严重，出现大面积停电，其中赣州、抚州电网遭到了毁灭性破坏。江西省共有 36 个县、940 个乡镇、14439 个行政村、762.6 万户居民停电。江西省最高用电负荷一度掉到 356 万千瓦，电力供应发布了红色预警信号。此次冰雪灾情给多个省市的基础设施造成了重大的损害，尤其是对电网造成了巨大的破坏，也给人民生活造成了极大的困难。表 7-7 中详细列出了在此次冰雪灾害中，500kV 输电线路倒塔及受损情况的统计数据。

此次冰雪灾害属于非常规突发事件中的自然灾害类事件，其情境特征表现为低温、雨雪等多种致灾因子形成气象灾害链情境，其影响具有以下特点：

(1) 本次冰雪灾害为历史上罕见，尤其是对于我国南方地区而言，几乎是百年一遇，无论是从备灾抗毁设计上，还是从灾害应急规划方面都缺乏准备。因此，此次冰雪灾害造成了巨大的损失，直接经济损失就高达 1000 亿元以上，而间接损失更是难以估量。

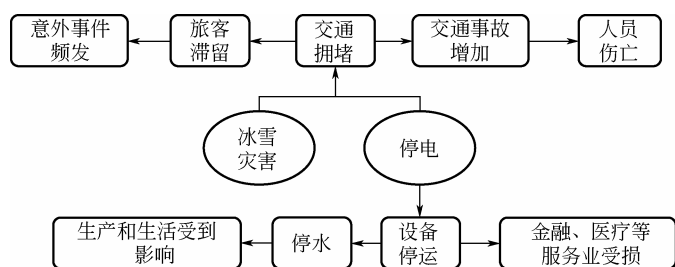


表 7-7 2008 年冰灾 500kV 输电线路倒塔及受损情况统计<sup>[125]</sup>

地区	损害 线路	倒塔基数（个）					（局部）受损基数（个）				
		直线塔		耐张塔		小计	直线塔		耐张塔		小计
		轻冰区	重冰区	轻冰区	重冰区		轻冰区	重冰区	轻冰区	重冰区	
浙江	17	130	0	8	0	138	19	0	6	0	25
湖北	2	9	0	3	1	13	2	0	1	0	3
重庆	1	5				5	1		1		2
湖南	12	135	0	9	0	144	20	0	5	0	25
江西	5	88	0	12	0	100	8	0	2	0	10
安徽	1	1				1	3				3
广西	4	6	0	4	0	10	8	0	4	0	12
贵州	15	131	2	8	4	145	37	3	13	2	55
华润 电力	2	322	31	27	21	401	44	1	7	2	54
合计	59	827	33	71	26	957	142	4	39	4	189
总计	1205										

（2）灾害链情境特征明显，次生衍生灾害严重。灾害的影响首先表现在对电力设备的破坏上<sup>[126]</sup>：由于很多电力设备需要直接布置在室外，它们首先受到了明显的破坏。例如，覆冰和大风造成了电线和塔杆的折断，以及大量的倒塔现象；雷击和污闪造成了线路跳闸和变压器的损坏。随着一些电力设备的破坏，部分电网的运行受到影响，整个电网的负荷发生变化，导致更多超负荷线路的损毁。而随着灾害的进一步持续，破坏也从最初对电网的影响逐渐转为衍生次生灾害的灾害链形破坏形式。即随着电网中断现象的不断发生，电力不足越来越明显，停电又导致了众多关键设施的停运。例如，交通指挥信号的中断造成频发的交通堵塞和交通伤亡事故；通信网络和其他服务设备的中断导致人群的恐慌并出现大规模人员聚集和滞

留现象；部分地区的供水出现困难，引发了一些恐慌性的抢购事件；同时，金融、医疗等民生相关领域的服务开始受到严重影响，这又导致更进一步的人群滞留，人民的日常生活基本无法正常开展（见图 7-7）。



◎ 图 7-7 冰雪灾害链

### 7.3.1 电网破坏的灾害情境要素分析

针对此次冰雪灾害事件的情景和动态情境进行分析，其组成要素特征分析如下。

#### （1）事件链要素

此次灾害是由冰雪灾情引发，随即导致了电网、交通网络、通信网络等基础设施网络的级联失效。灾害所造成电网破坏的灾害事件链包括：首先破坏电网设备，造成电力中断事故；交通管理受到影响，交通事故频发；轨道、航运等运输受到影响，部分交通瘫痪；电子设备没有电力供应，金融、医疗等服务业等被迫中断。

#### （2）致灾因子要素

这次冰雪灾害的主要致灾因子来源于气象因素。从天气气象角度分析，最主要的特点是超长时间的冰冻天气（全国范围内持续了 22~25 天）和超

高强度的覆冰（普遍覆冰高于 30mm，最高地区已超过了 80mm，严重超过了我国南方电网线路覆冰的设计标准）。

### （3）孕灾环境要素

与北方干燥的冬季气候不同，我国南方的冬季较为湿润，含有较多水分的空气在持续低温的因子作用下极易形成冻雨。南方部分地区海拔较高，且多山，这种地理环境也加速了在山顶、山垭口等微地形地带冻雨的形成。冻雨滴长时间落在结了冰的电网设备表面上并不断积累，就结成了雨凇。高密度的雨凇在线路、设备表面长时间不能脱落，对电网造成了巨大的危害。另外，当时南方正在进行冬季取暖，一些污染造成了空气中的较多污秽，在冻雨的作用下沉积在电网绝缘子表面，加剧了冰闪跳闸的发生。

### （4）承灾体分析

电网冰雪灾害的主要承灾体是电网设施。由于我国南方固有的气候特征和出于备灾成本上的考虑，在电网设计时较少考虑对如此规模极端低温冰冻气候的防灾。因此，此次灾害承灾体中的大部分电网网架薄弱，御灾能力低。明显的属性特点是覆冰外荷是按照 10 mm 或 15mm 标准设计的（据统计，发生倒塔的有 90%以上的覆冰设计标准低于 15mm），而灾害中的实际覆冰厚度则远远超过了这一标准。

## 7.3.2 复杂电网故障的情境网络

复杂电网的灾害是以南方雪灾为背景，由降水、低温等直接致灾因子结合大气环境、生物、社会经济等孕灾环境和承灾体状态因素层层叠加形成的，直至形成雪灾、电网破坏、交通中断等事件灾害链。其中任何一个环节的改变都有可能影响雪灾的发展方向和评估结果。

基于上述对冰雪灾害事件链、致灾因子、孕灾环境和承灾体等情境要

素的综合分析，在构造情境网络时，将初始的灾害破坏情境描述为：持续的低温气候作为明显的致灾因子与南方地区孕灾环境相互作用，导致形成了冻雨、覆冰等一系列的气象致灾因子。上述致灾因子作用在按照一定指标设计的输电线路及其内在元件（主要为杆塔、基站、导线和绝缘装置等）构成的承灾体之上，改变了承灾体的属性状态。即电力设施受到物理性破坏，造成了机械、逻辑性能上的失效，使电网的运行进入了非正常的运行状态。将上述致灾因子进行进一步拆分，可以得到此次冰雪灾害中的多维度情境。复杂电网故障情境的致灾成因与作用因子如表 7-8 所示。

表 7-8 复杂电网故障情境的致灾成因与作用因子

情境	致灾成因	情境作用因子
线路污害故障情境	主要为气象致灾因子，如降雨、潮湿、大雾等	(1) 根据线路经过地区的空气污染程度设计输电线路的抗污能力，对线路和设备增加防污措施； (2) 定期清理导线及设备上的污染物，避免长时期污染带来的化学作用
线路机械故障情境	气象因子与承灾体的综合作用	(1) 对特殊气象的预报和预防； (2) 提高导线和设备的材质和工艺质量； (3) 定期检查线路的机械故障，及时维修
导线腐蚀情境	空气湿度	(1) 提高导线和设备的防腐强度； (2) 增加防腐保护措施
冰雪灾害故障情境	致灾因子、孕灾环境和承灾体的综合作用	(1) 提高输电线路的负载能力； (2) 加装防冰雪装置； (3) 将强防护，及时清除积雪和覆冰

(1) 线路污害故障情境

输电线路常年暴露在空气中，大气中的大量灰尘、粉尘和其他污染物质极容易附着在输电线路上。在平常状态下，这些污染物质并不会对输电线路造成损害，但是当外界环境发生变化时则可能会促使上述污染物质发生化学变化，对线路造成损害。例如，降雨、霜露等气象条件会加速污染物质的溶解并覆盖在线路表面，从而破坏输电线路的绝缘性能。绝缘性能

的降低意味着输电线路极易发生输电线路表层漏电，形成污害故障情境。污害故障情境有以下特点：一是主要由气象因子导致，如降雨和大雾通常是污害故障情境高发的天气。二是污害故障情境的破坏范围较大、持续周期长，常常影响到相同或邻近区域的多条输电线路，并且在一段时间内容易重复发生。

### （2）线路机械故障情境

线路机械故障情境包含导线断线、导线间闪络和导线金具故障等情景。线路机械故障情境的特点是：致灾因子是气象因子（大风）导致与承灾体属性（线路的材料、强度等设计因素）的综合作用。因此，对该情境的作用因子主要包括对气象因子的预防与预测，也包括从设计上提高线路的机械指标和负荷能力。

### （3）导线腐蚀情境

导线腐蚀情境与线路污害情境类似，但强度更高，且致灾因子也更为复杂。除了气象因子可能导致导线腐蚀外，输电线路的材料选择和设计、加工工艺等环节上的因素都可能成为这一情境的致灾因子。

### （4）冰雪灾害故障情境

上述三种情境基本上都是致灾因子直接作用到承灾体上，因此形成原因与事件表现都相对清晰。相比之下，冰雪灾害这一情境限定了首要致灾因子为大规模的冰雪，但具体表现为致灾因子、孕灾环境和承灾体的综合作用下的一种复杂事件情境。既大规模冰雪可能引发上述灾害情境中的一种或多种。既可能引起输电线路的物理损坏，也可能导致化学变化引起线路损坏。因此，冰雪灾害情境对电网的破坏极大，应对也最为复杂，情境作用因子需要考虑较多的应对措施。

按照三层情境网络的划分，将上述情境归入三个层次中，并细化各个

情境层次中的出现的情景，按照情景之间的关联关系进行关联，可以得到以下情境网络的结构描述。

(1) 事件情境层：在该情境层次上，由冰雪灾害起始，有五个可能的情景序列。分别是：

序列 1：a—冰雪灾害—b—破坏输电线路—c—大面积停电—d1—通信网络受阻或中断—e1—救援指挥受阻；

序列 2：a—b—c—d2—依靠电力支撑的自动服务设备无法运行—e2—金融、商业、医疗、科研等工作无法开展；

序列 3：a—b—c—d3—供排水网络瘫痪—e3—工业、生活用水稀缺，生产生活被打乱—f—部分人群产生恐慌；

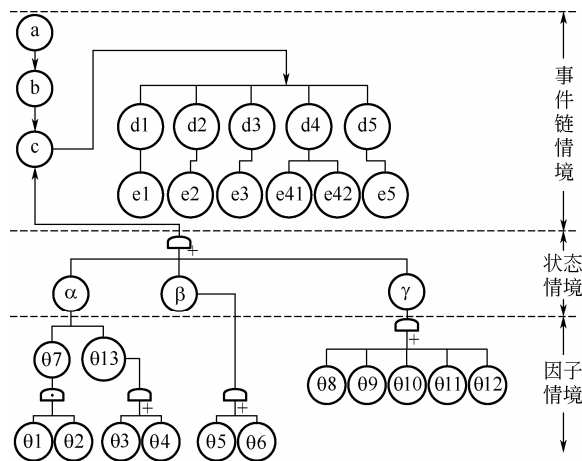
序列 4：a—b—c—d4—交通指挥失效，事故增多—e41—大量人员滞留车站—e42—货运中断；

序列 5：a—b—c—d5—日常生活受到影响—e5—引发其他社会问题。

(2) 状态情境层：冰雪灾害影响下的电网状态状态情境主要包括： $\alpha$ —冰闪引发的跳闸； $\beta$ —在风和覆冰的作用下电线不规则的舞动引发的断线和倒塔； $\gamma$ —变电器故障； $\eta$ —应急措施缺乏，导致抢修不及时。据统计，在此次的冰雪灾害中，仅湖南电网在 10 日内，冰闪就造成了 500kV 线路的跳闸发生 70 次以上，220kV 线路的跳闸发生 400 次以上。

(3) 因子情境层： $\theta_1$ —低温、 $\theta_2$ —冻雨、 $\theta_3$ —监测不及时、 $\theta_4$ —除雪设备落后、 $\theta_5$ —风力过大、 $\theta_6$ —电塔覆冰面积增大、 $\theta_7$ —覆冰时间过长、 $\theta_8$ —引线故障、 $\theta_9$ —线圈故障、 $\theta_{10}$ —分接开关故障、 $\theta_{11}$ —铁芯故障、 $\theta_{12}$ —套管故障、 $\theta_{13}$ —电线覆冰过厚。

电网冰雪灾害的情境网络如图 7-8 所示。



© 图 7-8 电网冰雪灾害的情境网络

情境重构的情境网络可以帮助决策人员更好地理解非常规突发事件多层次情境中的情景状态、变化和可能发展。同时，决策人员也可以针对情境网络图进行初步的决策。例如，可以利用图论中的经典分析方法对事件进行初步分析。以图 7-8 所示的电网破坏情境网络为例，可以通过对因子情境层的情景的概率预估，利用枚举状态等方法推算在顶层情境中的某个情景的发生概率；也可以通过割集的计算推演某个情景的前因情景的集合，初步判断最为危险的情景集合，为应急提供决策控制方向。

### 7.3.3 复杂电网故障的情境规则设计

冰雪灾害导致的电网破坏引发了基础设施网络的崩溃，针对这一典型情境建立的重构方法描述如下：

- Step1 建立基础设施网络节点集合  $J$ ，索引为  $j$ 。
- Step2 根据网络的服务关系，识别基础设施中的发点和收点，建立发

点集合  $\Omega$ ，索引为  $o$ ；收点集合为  $\Lambda$ ， $d$ ；路径集合为  $K$ ，索引为  $k$ ； $N_{od}$  为网络收发对间路径的集合； $f_{od}$  为网络收发对间中断前的流量； $\phi_k$  为路径  $k$  上所包含的设施的集合。

Step3 令  $q$  为破坏阻断的节点数， $p$  为通过情境作用因子可能修复的节点数，建立节点状态描述

$$s_j \begin{cases} =1, \text{节点 } j \\ =0, \text{反之} \end{cases} X_j \begin{cases} =1, \text{节点 } j \text{失效} \\ =0, \text{反之} \end{cases} Z_{od} \begin{cases} =1, \text{收发点对 } o-d \text{ 之间不连通} \\ =0, \text{反之} \end{cases}$$

Step4 建立如下的目标函数及约束，并求解。得到通过情境作用因子进行重点修复后的情景状态。

$$\min H(S) = \max \sum_o \sum_d f_{od} Z_{od}$$

s.t.

$$\sum_{k \in N_{od}} Y_k + Z_{od} \geq 1, \forall o, d$$

$$Z_{od} \leq (1 - Y_k), \forall o, d, k \in N_{od}, k$$

$$Y_k \geq 1 - \sum_{j \in \phi_k} X_j, \forall k, j \in \phi_k$$

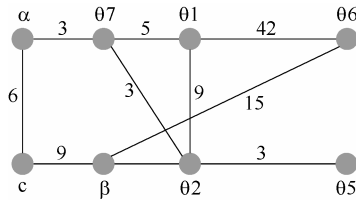
$$\sum_j X_j = q$$

$$X_j \leq 1 - S_j, \forall j$$

$$X, Y, Z = \{0, 1\}$$

图 7-9 所示为基础设施情境网络中的服务流交换网络结构，各节点之间互相通信，传送服务，其中对各边上流量之和进行了标注。针对该网络结构，由前文公式进行计算，得到不同情景下的服务流损失如表 7-9 所示。





◎ 图 7-9 基础设施情境网络中的服务流交换网络结构

表 7-9 不同情景下的服务流损失

不同情景中节点破坏数量（个）	最大服务损失
1	54
2	102
3	118
4	127
5	132
6	134
7	135
8	136

不失一般性，考虑每种灾害破坏情景包含两个破坏的网络节点，计算可知：当没有情境作用因子进行节点恢复时，在  $\theta_7$ 、 $\theta_1$  发生故障的情景  $S_0$  下，此时整个网络的服务流损失为 74.4%，决策者可以根据可采用的不同情境作用因子进行重构，当重构情景为  $S_1$ （ $\theta_7$ 、 $\theta_1$  节点得到修复）时，系统的服务流损失为 60.8%；当重构情景为  $S_2$ （节点  $\theta_1$ 、 $\theta_2$  得到修复）时，系统损失的服务流为 47.8%。根据情境重构的分析结果，决策者可以根据应急资源的情况进行决策，优先选择可以将事件演化到  $S_2$  情景的发展路线。

## 7.4 本章小结

---

本章选取了生产中断突发事件情景下供应链销售应急决策、复杂电网连锁故障应急研究,以及 2008 年中国南方冰雪灾害对复杂电网破坏三个案例,进行非常规突发事件情境重构和相关应急决策模型研究的案例分析。根据本书提出的情境描述模型和情境重构方法,分析在复杂电网中的情境网络设计,验证本书提出的模型和方法的现实应用。

## 结 论

非常规突发事件的“情景-应对”本质上属于应急响应管理的范畴，应对的基本瓶颈难题是如何有效识别突发事件的灾难情境。在应对实践中，面对罕见而突然爆发的致灾因素和承灾体，以及孕灾环境相互复杂耦合而导致的非常规突发事件，决策者的应对知识经验匮乏，应对时间极为紧迫，并且无法或不能获取充分完备的信息。在这种态势下，情境是识别和界定应对决策任务的基本要素，要识别非常规突发事件情境及其未来演化趋势，需要适应的非常规突发事件情境描述和情境重构表达的基础理论、方法、技术和应用模式。本书面向非常规突发事件情境重构模型进行研究，采用系统理论、灾害链理论、情景分析等方法 and 计算机仿真技术，对非常规突发事件情境重构涉及的概念、途径、方法和仿真实现等问题进行研究。本书内容的创新性研究成果如下：

(1) 区别与已有研究中用“情景”对事件状态和动态趋势的混合表述，用“情景”表述事件的静态状态、用“情境”表述事件的动态特性。界定了常规突发事件情景、情境及情境重构等基本概念内涵和关联关系，分析了非常规突发事件中的情境演化的特征和内在机制，构建了由信息到情境构成要素，到情境描述，再到情境演化，最后完成情境重构的研究框架。该研究框架明确区分了突发事件中的情景和情境的区别与关联，提出了非常规突发事件应关注的情境要素构成，为“情景-应对”范式下建立并描述事件情景、分析事件的动态情境演化、研究面向情景的应对决策建立了理论基础。

(2) 面向事件情境的构成要素，分析了非常规突发事件中的信息需求，

研究了多源信息融合的相关方法；针对非常规突发事件及事件动态演化过程进行定量描述的问题，研究了基于情境及情景序列的形式化表达模型，构建描述路径和多层次情境网络描述方法，进而为演化分析研究提供基础。情境网络描述方法通过在不同层次上的细化或凝练，可以有侧重地体现不同层次决策者的关注点。即高层决策者通过上层网络可以快速查看事件的发展态势和造成的影响，中层和底层决策者则可以通过下层网络相信查看、模拟和分析事件的影响因素、可能的发展趋势并进行应急决策。在多组织、多部门进行协同决策时，该方法可以为事件态势的展示和决策者对事件的认知与交互开辟一条新的途径。

（3）提出了非常规突发事件情境重构体系的现实途径和重构流程，并研究在信息不完全的情形下，基于模糊情境规则推理方法和情境演算算法进行情境演化分析的方法。该方法支持对灾害的演化路径，各种主要情景的演化关联关系进行动态重构描述。在此基础上，决策者可以利用适应的决策方法对衍生与次生灾害、抢险救灾行动等自然演化能量与应对措施对系统演化的集成影响进行定性与定量分析。情境重构方法通过与历史案例库、情境库等支持信息的集成，可以对事件情景进行模拟与推演，为时间约束下的事件情景分析提供了实现途径。

（4）研究情境重构情境网络可视化的实现方法和逻辑。给出了仿真模拟需要的设计方案，提出了针对多层情境网络优化设计的节点布局 and 全局拓扑显示的算法，并设计了与 GIS 集成的仿真模拟系统。该系统可以与地理信息系统进行集成，对非常规突发事件情境进行动态集成显示。该系统在应急准备、应急响应决策和应急演练等环节都可以辅助决策者更高效地了解事件的发生状况，并对事件未来的发展做出初步估计和模拟。

本书面向非常规突发事件情境重构模型研究，只是初步的、探索性的

研究。虽然已取得一定的研究成果，但仍存在一些不足之处，非常规突发事件情境重构有待进一步研究的问题和方向包括：

（1）本研究内容提出的情境重构模型，需要情境要素属性参数作为支撑，这些参数数据有些可以根据历史情境库中的统计数据获得，有的则缺少统计，在缺少数据统计的情况下本书采用了依靠专家知识进行补充的方法。但对于一些极为罕见的非常规突发事件，在无法获得专家知识构造相关要素参数数据的情况下，如何构造相关情景、情境网络是本书建模时必须解决的一个问题，同时也是本书研究继续深入的一个重要的研究方向。

（2）本研究内容提出的情境重构模型侧重于对非常规突发事件的描述与表现，作为决策者了解、理解、分析事件的基础性工具，是应急应对的前提性工作。在此基础上，需要对后续应对过程中的决策问题的识别、决策方法的设计展开进一步的研究。

## 参考文献

- [1] 闪淳昌. 提高应对突发公共事件的能力 [J]. 中国减灾, 2006 (1): 10.
- [2] Erskine M A, Pepper W. Enhancing Emergency Response Management using Emergency Description Information Technology EDIT: A Design Science Approach [J]. International Journal of Electronic Government Research, 2015, 11 (2): 51-65.
- [3] Barbaroso, G. A two-stage stochastic programming framework for transportation planning in disaster response. Journal of the Operational Research Society, 2004, 55 (1): 43-53.
- [4] Dai J. Earthquake Disaster Emergency Logistics of Transport Route Optimization Research [J]. IEMCS-14, 2014: 1165-1170.
- [5] Jonkman S N, Hiel L A, Bea R G, et al. Integrated Risk Assessment for the Natomas Basin (California) Analysis of Loss of Life and Emergency Management for Floods [J]. Natural Hazards Review, 2012, 13 (4): 297-309.
- [6] Haddad J, Lawler S, Ferreira C M. Assessing the relevance of wetlands for storm surge protection: a coupled hydrodynamic and geospatial framework [J]. Natural Hazards, 2016, 80 (2): 1-23.
- [7] Burgherr P, Hirschberg S. Comparative risk assessment of severe accidents in the energy sector [J]. Energy Policy, 2014, 74 (S1): 45-56.
- [8] P Burgherr, S Hirschberg. A comparative analysis of accident risks in fossil, hydro, and nuclear energy chains. Human and Ecological Risk

- Assessment: An International Journal, 2008, 14 (5): 947-973.
- [9] Song Y, Wang F, Wang B, et al. Time Series Analyses of Hand, Foot and Mouth Disease Integrating Weather Variables [J]. Plos One, 2015, 10 (3).
- [10] PE Parham, BK Singh, NM Ferguson. Analytic approximation of spatial epidemic models of foot and mouth disease. Theoretical population biology, 2008, 73 (3): 349-368.
- [11] GS Zaric, DM Bravata, JE Cleophas Holty, KM McDonald, DK Owens, ML Brandeau . Modeling the logistics of response to anthrax bioterrorism. Medical Decision Making, 2008, 28 (3): 332.
- [12] Kapucu N. Interorganizational Coordination in Complex Environments of Disasters : The Evolution of Intergovernmental Disaster Response Systems [ J ]. Journal of Homeland Security and Emergency Management, 2016, 6 (1): 191-197.
- [13] Gopalakrishnan V, Baskaran R, Venkatraman B. Design and implementation of wireless dose logger network for radiological emergency decision support system [J]. Review of Scientific Instruments, 2016, 87 (8): 085107.
- [14] 张尧, 樊治平. 基于随机占优度的随机多属性决策方法 [J]. 系统管理学报, 2010 (4): 371-378.
- [15] JS Niedbalski, K Deng, PG Mehta, S Meyn. Model reduction for reduced order estimation in traffic models: IEEE, 2008: 914-919.
- [16] W Cheng, J Lu. Operational analysis on emergency logistics system and emergency response model: IEEE, 2008: 1323-1328.

- [17] F Fiedrich, F Gehbauer, U Rickers. Optimized resource allocation for emergency response after earthquake disasters. *Safety Science*, 2000, 35 (1-3): 41-57.
- [18] L Özdamar, E Ekinici, B Küçükyazici. Emergency logistics planning in natural disasters. *Annals of Operations Research*, 2004, 129 (1): 217-245.
- [19] S Budge, A Ingolfsson, E Erkut. Approximating vehicle dispatch probabilities for emergency service systems with location-specific service times and multiple units per location. *Operations research*, 2007.
- [20] 刘春林, 盛昭瀚, 何建敏. 基于连续消耗应急系统的多出救点选择问题 [J]. *管理工程学报*, 1999 (3): 19-22.
- [21] 于辉, 陈剑. 突发事件下何时启动应急预案. *系统工程理论与实践*. 2007 (8): 27-32.
- [22] W Rui, X Jiuping. A Class of Uncertain Multiobjective Bilevel Harmonization Decision Model. *OR TRANSACTIONS*, 2005, 9 (2): 49-56.
- [23] 孙昭旭, 韩敏, 邱菀华. 一种多属性决策问题的分类方法研究 [J]. *控制与决策*, 2006 (2): 171-174.
- [24] 孙昭旭, 邱菀华. 一种新的基于模糊等式的群体决策方法 [J]. *系统工程理论方法应用*, 2005 (6): 572-573.
- [25] 徐玖平. 多目标决策的理论与方法 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [26] H. Kahn, A. Wiener, *The Year 2000* [M]. New York: MacMillan, 1967.



- [27] 宗蓓华. 战略预测中的情景分析法 [J]. 预测, 1994 (2): 50-51, 55.
- [28] 王众托, 王志平. 超网络初探 [J]. 管理学报, 2008 (1): 1-8.
- [29] 翁文国, 倪顺江, 申世飞, 袁宏永. 复杂网络上灾害蔓延动力学研究 [J]. 物理学报, 2007 (4): 1938-1943.
- [30] 欧阳敏, 费奇, 余明晖. 基于复杂网络的灾害蔓延模型评价及改进 [J]. 物理学报, 2008 (11): 6763-6770.
- [31] Dobson I, B. A. Carreras, D. E. Newman. A probabilistic loading-dependent model of cascading failure and possible implications for blackouts, in 36th Hawaii International Conference on System Sciences. Maui, Hawaii, 2003: 312-323.
- [32] Panagiotis Angeloudis, David Fisk. Large subway systems as complex networks [J]. Physica A, 2006, 367: 553-558.
- [33] 陈继东, 孟小峰, 赖彩凤. 基于道路网络的对象聚类 [J]. 软件学报, 2007 (2): 332-344.
- [34] 张勇, 杨晓光. 城市路网的复杂网络特性及可靠性仿真分析 [J]. 系统仿真学报, 2008 (2): 464-467, 513.
- [35] 李鹏翔, 席西民, 崔文田. 复杂科层组织网络中的无标度行为 [J]. 科技进步与对策. 2009 (1): 20-23.
- [36] Youmin Xi, Fangcheng Tang. Multiplex multi-core pattern of network organizations: An Exploratory Study [J]. Computational and Mathematical Organization Theory, 2004, 10 (2): 179-195.
- [37] 席运江, 党延忠. 基于加权知识网络的个人及群体知识结构分析方法 [J]. 管理工程学报, 2008 (3): 1-4, 35.
- [38] Bruce J. West, Elvis L. Geneston, Paolo Grigolini. Maximizing

- information exchange between complex networks [J]. *Physics Reports*, 2008, 468 (1): 1-19.
- [39] 谭跃进, 吴俊, 邓宏钟, 朱大智. 复杂网络抗毁性研究综述 [J]. *系统工程*, 2006 (10): 1-5.
- [40] 吴枝喜, 荣智海, 王文旭. 复杂网络上的博弈 [J]. *力学进展*, 2008 (6): 794-804.
- [41] Nagurney A, Qiang Q. Robustness of Transportation Networks Subject to Degradable Links [J]. *Europhysics Letters*, 2007, 80 (6): 1-6.
- [42] Zhao L, Nagurney A. A network modeling equilibrium for internet advertising: models, qualitative analysis and algorithms [J]. *European Journal of Operational Research*, 2008, 187 (2): 456-472.
- [43] Steven M. Rinaldi. Modeling and Simulating Critical Infrastructures and Their Interdependencies. 37th Hawaii International Conference On System Sciences. 2004: 234-242.
- [44] 王建伟, 荣莉莉. 突发事件的连锁反应网络模型研究 [J]. *计算机应用研究*, 2008 (11): 3288-3291.
- [45] RJ Swart, P. Raskin, J. Robinson. The problem of the future: sustainability science and scenario analysis. *Global Environmental Change, Part A: Human and Policy Dimensions*, 2004, 14 (2): 137-146.
- [46] D. Dyer, S. Cross, C. A. Knoblock, S. Minton, A. Tate. Guest Editors' Introduction: Planning with Templates. *Intelligent Systems*, IEEE, 2005, 20 (2): 13-15.
- [47] T. Strang. A context modelling survey., in *Workshop on Advanced Context Modelling, Reasoning and Management associated with the*

- Sixth International Conference on Ubiquitous Computing. 2004: Nottingham/England.
- [48] A. B. Kocaballi, A. Kocyigit. Granular Best Match Algorithm for Context-Aware Computing Systems. Pervasive Services, 2006 ACS/IEEE International Conference on, 2006: 143-149.
- [49] 肖盛燮. 灾害链式理论及应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [50] 高庆华, 刘惠敏, 马宗晋. 自然灾害综合研究的回顾与展望 [J]. 防灾减灾工程学报, 2003 (1): 97-101.
- [51] 史培军. 论灾害研究的理论与实践 [J]. 南京大学学报 (自然科学版), 1991 (11): 37 - 42.
- [52] 史培军. 再论灾害研究的理论与实践 [J]. 自然灾害学报, 1996, 5 (4): 6-17.
- [53] 史培军. 三论灾害研究的理论与实践 [J]. 自然灾害学报, 2002 (3): 1-9.
- [54] 史培军. 四论灾害研究的理论与实践 [J]. 自然灾害学报, 2005, 14 (6): 1-7.
- [55] 史培军. 五论灾害系统研究的理论与实践 [J]. 自然灾害学报, 2009, 18 (5): 1-9.
- [56] 周秉荣, 申双和, 李凤霞. 青海高原牧区雪灾逐级判识模型 [J]. 中国农业气象, 2006 (3): 210-214, 218.
- [57] S. Yue, 刘毅. 描述多变量暴雨事件的 Gumbel 逻辑模型 [J]. 水利水电快报, 2001 (15): 16-19.
- [58] 马庆国, 王小毅. 非常规突发事件中影响当事人状态的要素分析与数理描述 [J]. 管理工程学报, 2009 (3): 126-130.

- [59] 韩江洪, 郑淑丽, 陆阳, 魏振春, 于筑国. 离散事件控制系统规则化描述方法的研究 [J]. 合肥工业大学学报 (自然科学版), 2005, 28 (9): 1081-1084.
- [60] 周子新. Ponder 策略语言基于事件描述的扩展 [J]. 徐州工程学院学报, 2006 (9): 20-24.
- [61] 汪自勤, 宋文忠, 冯纯伯. 离散事件动态系统状态空间描述的进一步研究 [J]. 控制理论与应用, 1992, 9 (1): 39-43.
- [62] 张国华, 吴智铭. 混合动态系统中连续状态系统用离散事件系统描述的一致性 [J]. 信息与控制, 1997 (2): 50-54.
- [63] 李旭晖, 何炎祥, 彭智勇. 基于时间序列的离散事件系统模型语义描述. 2005 年全国理论计算机科学学样会论文集, 2005.
- [64] 张树峰, 邓胜春, 徐晓飞. 面向 RFID 的复杂事件描述语言研究及应用 [J]. 微计算机信息, 2009 (8): 224-225, 173.
- [65] 陈波, 彭澄廉, 王海洪, 刘宏亮. 分布式监测系统的事件流描述语言的设计 [J]. 计算机工程, 1995 (S1): 340-344.
- [66] 任胜兵, 陈松乔, 喻寿益. 基于事件序列的用例描述形式化及分析 [J]. 计算机工程与应用, 2004, 40 (23): 12-14, 64.
- [67] 刘玉坤, 石伟, 张晓萍, 陈昌祥. 描述离散动态系统的集合标识 Petri 网: STPNs [J]. 系统工程理论与实践, 2004 (7): 59-65.
- [68] Jonathan Lee, Jiann-I. Pan, Jong-Yih Kuo. Verifying scenarios with time Petri-nets [J]. Information and Software Technology, 2001, 43 (13): 769-781.
- [69] 赵玉明, 甘仞初, 鞠彦兵. 面向情景的机场应急仿真系统 Petri 网建模方法 [J]. 计算机工程与应用, 2006 (18): 277-288, 232.

- [70] Maohua Zhong, Congling Shi, Tairan Fu, Li He, Jiehong Shi. Study in performance analysis of China Urban Emergency Response System based on Petri net [J]. Safety Science, 2010, 48 (6): 755-762.
- [71] 范海军, 肖盛燮, 郝艳广, 周丹, 贺丽丽. 自然灾害链式效应结构关系及其复杂性规律研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2006 (S1): 2603-2611.
- [72] 季学伟, 翁文国, 赵前胜. 突发事件链的定量风险分析方法 [J]. 清华大学学报 (自然科学版), 2009 (11): 1749-1752, 1756.
- [73] 李藐, 陈建国, 陈涛, 袁宏永. 突发事件的事件链概率模型 [J]. 清华大学学报 (自然科学版), 2010 (8): 1173-1177.
- [74] 李湖生. 应急管理阶段理论新模型研究 [J]. 中国安全生产科学技术, 2010 (5) 2010, 6 (5): 18-22.
- [75] 韩传峰, 陈建业, 孙庆荣, 吴启迪. 黄河中下游灾害系统的脆性源控制 [J]. 系统工程理论与实践, 2006 (6): 135-140.
- [76] I. Foster, C. Kesselman, J. M. Nick, S. Tuecke. Grid services for distributed system integration [J]. Computer, 2002, 35 (6): 37-46.
- [77] J. Leon Zhao. Schema coordination in federated database management: a comparison with schema integration [J]. Decision Support Systems, 1997, 20 (3): 243-257.
- [78] G. Wiederhold. Mediators in the architecture of future information systems [J]. Computer, 1992, 25 (3): 38-49.
- [79] Chaudhuri S, Dayal U. An overview of data warehousing and OLAP technology [J]. SIGMOD Record, 1997, 26 (1): 65-74.
- [80] 石俊杰, 李毅松, 彭清卿, 孙炜. 国家电网公司调度系统数据整合总

- 体方案的思考 [J]. 电力信息化, 2006 (6): 28-31.
- [81] 滕乐天, 王晓东. 上海电力公司生产管理系统的功能定位与关键技术 [J]. 电力信息化, 2008 (1): 48-51.
- [82] 王晓波, 樊纪元. 电力调度中心统一数据平台的设计 [J]. 电力系统自动化, 2006 (22): 89-92.
- [83] Attaluri G K, Bradshaw D P, Coburn N. The CORDS multi-database project [J]. IBM Systems Journal, 1995, 1 (34): 39-62.
- [84] 申德荣, 于戈, 聂铁铮, 寇月. 支持多领域动态数据集成的数据库网格系统 [J]. 软件学报, 2006 (11): 2302-2313.
- [85] 刘伟, 孟小峰, 孟卫一. Deep Web 数据集成研究综述 [J]. 计算机学报, 2007 (9): 1475-1489.
- [86] R.Ahmed, P.DeSmedt, W.Du, W.Kent, M.A.Ketabchi, W.A.Litwin, A.Rafii, M.C.Shan. The Pegasus heterogeneous multidatabase system [J]. Computer, 1991, 24 (12): 19-27.
- [87] 石祥滨, 张斌, 王国仁, 于戈, 郑怀远, 赖翔飞. SCOPE/CIMS 系统中模式集成的形式化基础 [J]. 计算机学报, 1998 (11): 1015-1021.
- [88] 金蓓弘, 邵丹华, 李京, 刘昕. 实时数据集成技术及其应用 [J]. 计算机研究与发展, 2002 (2): 172-177.
- [89] 路燕, 张彪, 施伯乐. 一种新的 Web 数据模型——EOEM [J]. 小型微型计算机系统, 2003 (7): 1228-1230.
- [90] 金海, 孙傲冰, 郑然, 何儒汉, 章勤, 吴松. 医学图像网格基于语义的信息集成方法 [J]. 软件学报, 2007 (8): 2049-2062.
- [91] TJ Green. Models for incomplete and probabilistic information [J]. Managing and Mining Uncertain Data, 2009, 29 (1): 9-43.

- [92] W Hu, Y Qing, Y Ming-hui, F Qi. Grid-based platform for disaster response plan simulation over Internet[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2008, 16 (3): 379-386.
- [93] Feng Xu, Xuping Chen, Aizhu Ren, Xinzheng Lu. Earthquake Disaster Simulation for an Urban Area, with GIS, CAD, FEA, and VR Integration [J]. Tsinghua Science & Technology, 2008, 13 (s1): 311-316.
- [94] 官东, 蔡自兴. 基于 HLA 的网格仿真服务支持研究 [J]. 系统仿真学报, 2008 (3): 635-638, 642.
- [95] Keisuke Uno, Kazuo Kashiya. Development of Simulation System for the Disaster Evacuation Based on Multi-Agent Model Using GIS [J]. Tsinghua Science & Technology, 2008, 13 (s1): 348-353.
- [96] 蒋杰, 吴玲达, 徐江斌. 基于数字地球的洪灾演进模型表现 [J]. 计算机工程与应用, 2009 (36): 1-4, 164.
- [97] 李碧君, 徐泰山, 薛禹胜, 尹玉君, 郑亮. 大电网安全稳定综合协调防御系统的工程设计方法 [J]. 电力系统自动化, 2009 (23): 90-93, 102.
- [98] 吴文传, 张伯明, 曹福成, 陈佩琳, 赵泰峰, 钱苏晋. 电网应急指挥技术支持系统设计与关键技术 [J]. 电力系统自动化, 2008 (15): 1-6, 25.
- [99] 张婧, 杨锐, 申世飞. 蓄意致灾情景下的应急信息策略 [J]. 清华大学学报 (自然科学版), 2010, 50 (8): 1163-1167.
- [100] 姜卉, 黄钧. 罕见重大突发事件应急实时决策中的情景演变 [J]. 华中科技大学学报 (社会科学版), 2009, 23 (1): 104-108.
- [101] Levy D. Chaos Theory and Strategy: Theory, Application, and

- Management Implications[J]. Strategic Management Journal, 1994 (15): 167-178.
- [102] 薛澜, 张强, 钟开斌. 危机管理: 转型期中国面临的挑战 [J]. 中国软科学, 2003 (4): 6-12.
- [103] 陈忠. 系统演化的趋极性原理 [J]. 科学技术与辩证法, 1995 (2): 9-13.
- [104] Steve Vinoski. CORBA: integrating diverse applications within distributed heterogeneous environments [J]. IEEE Communication Magazine, 1997, 14 (2): 46-55.
- [105] 王英林, 张申生. 基于本体影射规则的软件集成重构研究 [J]. 计算机学报, 2001, 24 (7): 776-783.
- [106] 周卫, 缪升, 屈俊童, 张瑶. 电网系统气象灾害的精细化预警研究 [J]. 云南大学学报 (自然科学版), 2008 (S2): 286-290.
- [107] 秦伟俊. 基于本体的智能空间情境信息模型研究 [D]. 清华大学, 2005.
- [108] T Gu, HK Pung, DQ Zhang. A service-oriented middleware for building context-aware services [J]. Journal of Network and Computer Applications, 2005, 28 (1): 1-18.
- [109] A. Ranganathan, J. Al-Muhtadi, R. H. Campbell. Reasoning about uncertain contexts in pervasive computing environments [J]. Pervasive Computing, IEEE, 2004, 3 (2): 62-70.
- [110] J McCarthy. Programs with common sense [M]. RLE and MIT Computation center, 1960.
- [111] 邓聚龙. 灰理论基础 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002.



- [112] 薛禹胜. 停电防御框架向自然灾害预警的拓展 [J]. 电力系统自动化, 2013 (16): 18-26.
- [113] 曹一家, 王光增. 电力系统复杂性及其相关问题研究 [J]. 电力自动化设备, 2010 (2): 5-10.
- [114] 王信茂. 对“十二五”加快电力发展方式转变的思考 [J]. 能源技术经济, 2010, 22 (5): 1-7.
- [115] 胡学浩. 美加联合电网大面积停电事故的反思和启示 [J]. 电网技术, 2003 (9): 2-6.
- [116] 王英英. 采用图论的电网连锁故障模式搜索方法 [J]. 高电压技术, 2010 (2): 401-405.
- [117] 邓慧琼. 基于不确定多属性决策理论的电网连锁故障模式搜索方法 [J]. 电网技术, 2005 (13): 50-55.
- [118] 孟仲伟, 鲁宗相, 宋靖雁. 中美电网的小世界拓扑模型比较分析 [J]. 电力系统自动化, 2004 (15): 21-24, 29.
- [119] 曹一家. 大电网安全性评估的系统复杂性理论研究 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2007 (1): 1-8.
- [120] Cao, Y. A neighbourhood evolving network model [J]. Physics Letters A, 2006, 349 (6): 462-466.
- [121] Yook, S. H. Weighted evolving networks [J]. Physical Review Letters, 2001, 86 (25): 5835-5841.
- [122] Wang, X. F., G. Chen. Synchronization in scale-free dynamical networks: robustness and fragility [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications, 2002, 49 (1): 54-62.
- [123] 丁理杰. 复杂电网连锁故障大停电分析与预防研究 [D]. 浙江大学,

2008.

- [124] Liscouski, B. and W. Elliot, Final report on the august 14, 2003 blackout in the united states and canada: Causes and recommendations. A report to US Department of Energy, 2004, 40: 4-16.
- [125] 吴向东, 张国威. 冰雪灾害对电网的影响及防范措施 [J]. 中国电力, 2008 (12): 14-18.
- [126] 马树宝, 吴超. 南方冰雪灾害链式动态演化与控制研究. 中国职业安全健康协会年学术年会, 中国海南海口, 2008.
- [127] 姚杰, 计雷, 池宏. 突发事件应急管理中的动态博弈分析 [J]. 管理评论, 2005, 17 (3): 46-50.
- [128] Søren Glud Johansen, Anders Thorstenson. An inventory model with Poisson demands and emergency orders [J]. International Journal of Production economics, 1998, 56: 275-289.
- [129] Tagaras George, Vlachos Dimitrios. A periodic review inventory system with emergency replenishments [J]. Management Science, 2001, 47 (3): 415-429.
- [130] Chi Chiang. A note on optimal policies for a periodic inventory system with emergency orders. Computers & Operations Research, 2001, 28 (2): 93-103.
- [131] Esmail Mohebbi. Supply interruptions in a lost-sales inventory system with random lead time [J]. Computers & Operations Research, 2003, 30: 411-426.
- [132] Mahmut Parlar. Continuous-review inventory problem with random supply interruptions [J]. European Journal of Operation Research,

1997, 99: 366-385.

- [133] 刘春林, 施建军, 李春雨. 模糊应急系统组合优化方案选择问题的研究 [J]. 管理工程学报, 2002, 16 (2): 25-28.
- [134] Kirstin Zimmer. Supply chain coordination with uncertain just-in-time delivery [J]. International Journal of Production Economics, 2002, 77 (1): 1-15.
- [135] Qi X T, Bard J, Yu G. Supply chain coordination with demand disruptions [J]. Omega, 2004, 32 (4): 301-312.
- [136] H Yu, J Chen, G Yu. Supply chain coordination under demand disruptions with quantity discount contract [J]. IEEE, 2005: 712-715.
- [137] Min Soo Suh, Albert Lee, Yung Jae Lee, et al.. Evaluation of ordering strategies for constraint satisfaction reactive scheduling [J]. Decision Support Systems, 1998, 22: 187-197.
- [138] Thomas Tsukada, Kang G. Skin. Intelligent disruption recovery for decentralized manufacturing systems [A]. Proceedings of International Conference on Robotics and Automation [C]. Atlanta: IEEE Computer Society Press, 1993: 852-857.
- [139] Gérard P. Cachon. Supply Chain Coordination with Contracts [A]. In: A. G. de Kor and S. C. Graves, Eds. Handbooks in OR & MS [C]. Elsevier B. V, 2003: 229-339.
- [140] 方齐云. 完全理性还是有限理性 [J]. 经济评论, 1994 (4): 39-43.